

Bachelorarbeit

Erprobung von Greifstrategien für unteraktuierte Hände

Fabian Herold

abgegeben am 13.02.2017

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

Institut für Robotik und Mechatronik

Fakultät Elektrotechnik

Studiengang Bachelor of Engineering Mechatronik

Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt

FH·W-S

Hochschule
für angewandte Wissenschaften
Würzburg-Schweinfurt



DLR

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt

Bibliographische Beschreibung

Verfasser: Fabian Nikolas Herold
Matrikel-Nummer: 3713017
Titel: Erprobung von Greifstrategien für unteraktuierte Hände
Art: Bachelorarbeit/Abschlussarbeit
Seiten: 84
Abbildungen: 56
Tabellen: 4
Literatur: 25
Bearbeitungszeitraum: 01.10.2016 bis 30.11.2016

Hochschulbetreuung

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Martin Ochs
Zweitprüfer: Prof. Dr. rer.nat. Bettina Brandenstein-Köth

Institutionelle Betreuung

Betreuung: Dipl.-Ing. (FH) Werner Friedl
Dr. Máximo A. Roa
Dr. Hannes Höppner

Kurzreferat

Das Projekt der Europäischen Union (EU) Soft Manipulation (SoMa) beschäftigt sich ausschließlich mit der Entwicklung von unteraktuierten Roboterhänden. An diesem Projekt ist das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) beteiligt, welches mit verschiedenen Teams anderer Forschungseinrichtungen zusammenarbeitet. In einigen Studien der Projektpartner konnte beobachtet werden, dass der Mensch mit Hilfe seiner Umgebung, beispielsweise einer Tischoberfläche oder dem Rand einer Kiste, interagiert, um dadurch ein zu greifendes Objekt besser aufnehmen zu können. Durch Benutzen dieser Oberfläche kann er seine individuellen Ungenauigkeiten in Wahrnehmung und Bewegung gut kompensieren. Genau diese Probleme treten auch in der Robotik auf. Vor allem die Fehler von Bildverarbeitung, Kinematik und Regelungsfehlern führen zu einer falschen Position zwischen Hand und Objekt. Ein sauberer Griff ist somit ausgeschlossen. Eine Abwendung der sogenannten „environment constraint exploration“, ist das Greifen von Obst und Gemüse in einem Online Supermarkt, um gewünschte Ware an den Kunden auszuliefern. Dabei ist es wichtig die Ware möglichst sanft zu greifen, um ihre Haltbarkeit nicht zu verkürzen. Die Aufgabe dieser Bachelorarbeit ist das Erproben von verschiedenen Greifstrategien unter der Benutzung verschiedener Roboterhände. Um die Greifstrategien testen zu können, stellt man eine Situation im Online Supermarkt nach. Dabei wird eine Verpackungsstation zum Vorbild genommen, welche durch ein Bildverarbeitungssystem die Position des zu greifenden Objektes erfasst und dem Roboter zur Verfügung gestellt wird. Man versucht anschließend das Objekt mit einer der ausgewählten Strategien durch der Roboterhand zu greifen. Es wird außerdem großen Wert darauf gelegt, zu vergleichen, ab wann es sich wirklich lohnt die Umwelt als Hilfsmittel zu benutzen.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	4
Formelzeichen	5
Danksagung	6
1 Einführung	7
2 Ausgangssituation	10
2.1 Projekt der Europäischen Union: Soft Manipulation	10
2.2 Aufgabenstellung und Use Case	10
3 Grundlagen zum Leichtbauroboter LBR	13
3.1 Technische Daten	13
3.2 Mechatronisches Design	14
3.3 Regelungskonzepte	17
3.4 Anwendungsbereiche	20
4 Literaturrecherche zu Greifvarianten	23
4.1 Definition der virtuellen Finger	23
4.2 Griffdefinition und Greifvarianten (Types of Grasps)	25
4.3 Anwendung der Greifvarianten	33
5 Vorstellung unteraktuierter Roboterhände	35
5.1 Definition: unteraktuierte Roboterhände	35
5.2 Pisa-IIT Softhand	36
5.3 RBO Hand 2	39
5.4 DLR WHISG Hand	42
6 Literaturrecherche zu Greifstrategien	45
6.1 Unterscheidung Greifstrategie versus Greifvariante	45
6.2 Greifstrategien	46
7 Implementierung der Greifstrategien	49
7.1 Programmierung des Leichtbauroboters	49
7.2 Programmierung der Roboterhände	50
7.3 Programmierung der Hilfsmittel	51
8 Vorstudie mit fest positioniertem bekannten Objekt	52
8.1 Bewertungskriterien für eine Greifvariante	52
8.2 Versuchsaufbau	55
8.3 Durchführung der Vorstudien	58
9 Kriterien für eine Greifstrategie	67
10 Analyse und Diskussion der Versuchsergebnisse	70
11 Zusammenfassung und persönliches Fazit	76

Abbildungsverzeichnis	79
Tabellenverzeichnis	80
Literatur	83
Selbstständigkeitserklärung	84

Abkürzungsverzeichnis

DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

LBR Leichtbauroboter

SoMa Soft Manipulation

TUB Technische Universität Berlin

UNIPi Universität Pisa

IIT Italienisches Institut für Technologie

IST Austria Institut für Wissenschaft und Technologie Österreich

Ocado Ocado Group

DRZ Disney Forschungslabor Zürich

KMR Kraft-/ Momentregelung

KMS Kraft-/ Momentsensor

KS Kraftsensor/-en

TCP Werkzeugmittelpunkt, engl. tool center point

IFCO Engl. international fruit container

MRI Mensch-Roboter-Interaktion

MRK Mensch-Roboter-Kollaboration

VF Virtuelle Finger

HsS Handspezifische Strategie

RsS Roboterspezifische Strategie

Formel- und Sonderzeichen

θ	Motorposition
$\dot{\theta}$	Motorgeschwindigkeit
$\theta_{\mathbf{d}}$	Gewünschte Gelenkposition
τ	Moment im Gelenk
$\dot{\tau}$	Ableitung des Gelenkmomentes
$\tau_{\mathbf{d}}$	Gewünschtes Moment am Gelenk Output
q	Gelenkposition
$\bar{q}(\theta)$	Geschätzte Gelenkposition
x_d	Gewünschte kartesische Position
$x(\bar{q})$	Vorwärtskinematik
$J(\bar{q})$	Jacobi-Matrix
$g(\bar{q})$	Schwerkraftsmoment
$\tilde{x}(\theta)$	Abweichung zwischen gesetzter Position und aktueller Position
K_x	Federsteifigkeit
D	Dämpfung
B	Trägheit

Danksagung

Diese Bachelorarbeit *Erprobung von Greifstrategien für unteraktuierte Hände* entstand im Rahmen meines von der Hochschule vorgeschriebenen Praxissemesters (SoSe 2016) beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. und dort im Institut für Robotik und Mechatronik. Das erarbeitete Thema der Bachelorarbeit wurde sehr schnell dank der Betreuung vonseiten des DLR gefunden. Für diese Unterstützung und das außerordentlich interessante Thema der Bachelorarbeit möchte ich mich bei meinem Betreuer, Herrn Werner Friedl, herzlich bedanken. Ebenfalls gilt mein Dank den weiteren institutionellen Betreuern Herrn Máximo A. Roa und Herrn Hannes Höppner, die mir immer mit Rat und Tat zur Seite standen. Vor allem Herrn Roa möchte ich besonders hervorheben, da er mich bei schwierigen Fragen zu Greifvarianten und Greifstrategien wieder auf den richtigen Weg gebracht hat. Auch bei Herrn Florian Schmidt möchte ich mich für die wichtige Sicherheitseinführung am Leichtbauroboter (LBR), sowie für die Einführung in seinen *Links and Nodes Manager* bedanken. Ebenfalls danke ich ihm für die Hilfe bei der Integration von Programmcode in den verwendeten Rechner im RaceLab. Dank gilt auch Herrn Antonio Gonzales Marin für das zur Verfügung stellen seiner in Matlab implementierten Robotersimulation und für die Betreuung am Roboter während der Vorstudie. Für die Betreuung seitens der Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt möchte ich mich bei meinem Professor Herrn Martin Ochs herzlich bedanken, der sich trotz der Aufgaben als Dekan bereit erklärt hat, meine Abschlussarbeit zu betreuen. Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie herzlich bedanken. Einmal bei meinen Eltern Petra und Andreas, die mich während der kompletten Beschäftigung beim DLR sowohl moralisch als auch finanziell unterstützt haben. Zum anderen gilt ein großes Dankeschön meiner Tante Anne und meinem Patenonkel Klaus, die in ihrer Wohnung in München ein Zimmer für mich frei gemacht haben und ich dort fast ein ganzes Jahr wohnen durfte. Und zum Schluss bei meiner Freundin Elena, die mich trotz der Verlängerung des Vertrages beim DLR auf neun Monate immer unterstützt hat und mich immer wieder aufgebaut hat, falls mal etwas nicht funktionierte wie ich das wollte. Vielen Dank für alles.

1 Einführung

Es werden immer mehr robotische Lösungen in den Alltag der Menschen integriert, da die Automatisierung in unserer Gesellschaft immer weiter voranschreitet. Diese sind dafür gedacht, den Menschen in verschiedenen Situationen zu unterstützen oder ihm sogar die Arbeit, bei körperlich anspruchsvollen oder eintönigen Tätigkeiten, abzunehmen. Auch für Menschen mit körperlichen oder anderen Einschränkungen sind diese geeignet.



Abbildung 1: LBR III mit der DLR Hand II. Quelle: [ASOH07]

Dabei sind die Roboter voll und ganz für die Interaktion mit dem Menschen ausgelegt und bekommen in speziellen Fällen sogar humanoide Endeffektoren – besonders wenn es um schwer greifbare Objekte beziehungsweise den Themenbereich Service- und Assistenzrobotik geht – verpasst. In Abb. 1 sieht man den vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelten Leichtbauroboter (LBR) III, der hier mit der DLR Hand II versehen ist. Dieser wurde in einer Kooperation erfolgreich zum Augsburger Industrieroboterhersteller *Keller und Knappich Augsburg* (KUKA) transferiert. Der Leichtbauroboter wird später im Detail mit seinen kollaborativen Fähigkeiten in Abschnitt 3 vorgestellt. In der Industrie werden beispielsweise schon robotische Helfer, zu sehen in Abb. 2, eingesetzt. Dieser Assistent wurde unter anderem vom Fraunhofer Institut entwickelt. Der Name des Assistenzroboter ist *ANNiE*. Er kann für den Menschen, zum Beispiel wie in Abb. 2, ein Item Profil passend halten. Neben dieser autonomen Assistenzfunktion, verfügt der Roboter auch über ebenfalls autonome Hol- und Bringdienste sowie unterschiedliche Montage- und Prüfaufgaben.

ANNiE besitzt einen Drei-Finger-Greifer, der den drei menschlichen Fingern Daumen, Mittel- und Zeigefinger nachempfunden ist. Außerdem kann der Assistenzroboter über Bildverarbeitung eigene Entscheidungen treffen und mit dem kollaborativen Roboterarm dem Menschen assistieren [IM16].

Diese Art der Zusammenarbeit wird als Mensch-Roboter-Interaktion (MRI) oder auch Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) bezeichnet. Diese Eigenschaft der Roboter, um beispielsweise mit dem Menschen zu interagieren, kann durch Kraft- und Momentsensoren in den Gelenken der Roboter realisiert werden. Das und das geringe Gewicht der

Roboterarme sorgen für einen sicheren Umgang mit der Maschine, sodass schwerwiegende Verletzungen so gut wie gar nicht auftreten können.

Allerdings kann das nicht nur in dem Szenario der MRK von Vorteil sein, sondern wird auch für verschiedene andere Anwendungen hergenommen, da man unter anderem die gemessenen Kräfte und Momente auf den Rechner und damit in den Regelkreis geliefert bekommt. Mit diesen Werten können viele Dinge in Bezug auf Kollaboration und sogar Feinfühligkeit realisiert werden.

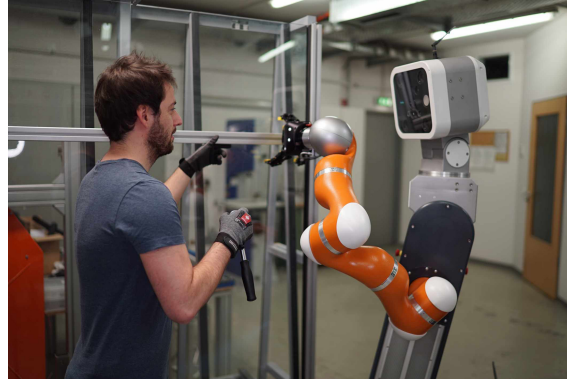


Abbildung 2: Assistenzroboter ANNiE. Quelle: [IM16]

Ein weiteres Anwendungsbeispiel für das Zusammenspiel von Roboterarm und Roboterhand ist der *DLR EMG-controlled Daily Assistant* (s. Abb. 3) oder im Folgenden auch DLR EDAN. Hier werden elektromagnetische Impulse vom Gehirn verarbeitet und in eine Bewegung des Roboterarms sowie der Roboterhand umgewandelt. Hier kann Menschen mit Handicap wieder der Schritt zur Eigenständigkeit eröffnet werden [VHS⁺14].

Wie anschließend vorgestellt wird, kann man diese Roboterarme und robotischen Hände nicht nur im Bereich der Servicerobotik, sondern auch im Gebiet der Lebensmittelindustrie, einsetzen.



Abbildung 3: Assistenzsystem DLR EDAN. Quelle: [DLR16a]

Der britische Onlinesupermarkt Ocado möchte beispielsweise zur Automatisierung seiner Verpackungsprozesse genau solche robotischen Lösungen zum Greifen von empfindlichen Lebensmitteln einsetzen. So wird versucht die wichtigsten Attribute der oben aufgezeigten

Servicerobotik zu vereinen. Hier sind die Regelungskonzepte der vom DLR entwickelten LBR, die in ihrer Steifigkeit veränderbar sind, gemeint. Denn in der Lebensmittelindustrie handelt es sich oftmals um nachgiebige und empfindliche Objekte wie Obst oder Gemüse, die gegriffen werden sollen. Ebenfalls greift man auf die vom DLR zur Verfügung gestellten Python Klassen für die Programmierung des LBR zurück. Diese Klassen werden zur Ansteuerung des Roboterarmes benötigt.

Für einen intelligenten Part sorgt eine Bildverarbeitung, die beispielsweise auch im Assistenzroboter *ANNiE* verbaut ist. So sollen Objekte mit ihrer Geometrie und Position erkannt werden, um so einen erfolgreichen Griff auszuführen.

Dafür wird zunächst das EU Projekt SoMa und die involvierten Forschungspartner vorgestellt. Unter der Überschrift *Aufgabenstellung und Use Case* wird anschließend auf das konkrete Ziel der Arbeit und auf den Use Case, der vom Onlinesupermarkt Ocado definiert wurde, eingegangen. Zur erfolgreichen Ausführung der Griffe werden hierzu definierte Greifvarianten aus der Literatur aufgegriffen.

Am Projekt SoMa ist, wie bereits erwähnt, Ocado beteiligt, für dessen Verpackungsprozesse Ergebnisse dieser Bachelorarbeit von Nutzen sein sollen. Anschließend wird der LBR mit seinen technischen Daten, seinem mechatronischen Design, seinen Regelungskonzepten und seinen Anwendungsbereichen vorgestellt. Als nächstes folgt eine Recherche zu bestehenden Greifvarianten. Hier werden als erstes Definitionen und Einschränkungen einer Greifvariante erläutert sowie bereits definierte Griffe aufgezeigt. Die angesprochenen Roboterhände werden in Abschnitt 5 - nach der Definition des Begriffes *Unteraktuation* - aufgeführt. Dabei wird auf die Wirkungsweise, die technischen Eigenschaften, die Steuerung und die umsetzbaren Greifvarianten der einzelnen humanoiden Hände eingegangen. Nachdem die Roboterhände detailliert vorgestellt wurden, wird als nächstes versucht aus dem angeeigneten Wissen Greifstrategien für die unterschiedlichen Hände aufzustellen. Dazu wird in der Literatur recherchiert und eigene Lösungen werden aufgestellt. Eine Unterscheidung zwischen Greifstrategie und Greifvariante wird ebenfalls aufgezeigt. Die Umsetzung der entwickelten Strategien wird im Abschnitt 7 erläutert. Hierbei wird die Struktur des Programmcodes erläutert. Es wird zwischen der Programmierung des Leichtbauroboters, der Roboterhände und der Hilfsmittel differenziert. Um Bewertungskriterien an eine Greifvariante aufstellen zu können, wird in Abschnitt 8 eine Vorstudie zum Greifen von fest positionierten bekannten Objekten durchgeführt. Dazu wird zunächst ein Schema erläutert, welches den in einer Greifstrategie entstandenen Griff bewerten soll. Dann wird der gesamte Versuchsaufbau, der für die Vorstudie benutzt wurde, erklärt. Im Anschluss daran wird die Durchführung der Vorstudien anhand von Bilderreihen für jede Roboterhand vorgestellt. Dabei können auch Videoaufnahmen von der beigelegten DVD angesehen werden. Aus den in den Vorstudien erhaltenen Erfahrungen und Ergebnissen werden in Abschnitt 9 Kriterien aufgestellt, die unerlässlich für eine Greifstrategie sind. Die Ergebnisse werden im Nachhinein analysiert und diskutiert. Hier wird kritisch Stellung genommen und mögliche Verbesserungen vorgestellt. So wird in Abschnitt 10 *Ausblick* der eigentlich geplante Bearbeitungsstand der Aufgabe erläutert sowie auf bereits umgesetzte aber nicht für die Vorstudie verwendbaren Implementierungen und Überlegungen eingegangen. Abschließend wird die Arbeit zusammengefasst und ein persönliches Fazit gezogen.

2 Ausgangssituation

Im Kapitel *Ausgangssituation* wird das EU Projekt SoMa sowie die Forschungspartner, die in diesem Projekt zusammenarbeiten, vorgestellt. Anschließend folgt eine ausführliche Einleitung und Vorstellung der Aufgabenstellung der Bachelorarbeit. Dabei wird auch auf den Use Case, der an die Aufgabenstellung geknüpft ist, eingegangen.

2.1 Projekt der Europäischen Union: Soft Manipulation

Im EU Projekt SoMa werden einfach zu bedienende Systeme entwickelt. Diese besitzen aber dennoch nachgiebige, starke und robuste Eigenschaften. Die allgemeine Beschreibung dient hierbei der Freiheit der Ideenfindung und Ausweitung der Möglichkeiten, aber im Grunde genommen werden die menschlichen Hände zum Vorbild genommen. Man entwickelt Roboterhände, die im Gegensatz zu beispielsweise einem simplen Backengreifer, viel flexibler einsetzbar sind. Man spricht im Zusammenhang mit diesem Projekt auch oft von unteraktuierten Händen (Definition in Abschnitt 5.1).



Abbildung 4: SoMa Logo. Quelle: [DLR16c]

Ein weiteres Ziel des Projekts ist es, diese Roboterhände in ihren Fertigkeiten mit Hilfe der zur Verfügung gestellten Umwelt zu verbessern. So benutzt beispielsweise das Vorbild Mensch beim Greifen von Objekten seine Umwelt. Das gibt ihm die Möglichkeit seine Ungenauigkeiten über die benutzte Umgebung zu kompensieren. Wobei es sich bei der angesprochenen Umwelt um eine Tischoberfläche, die Wand einer Kiste oder Ähnlichem handeln kann.

An dem SoMa Projekt ist das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. beteiligt und steht in Kooperation mit einigen weiteren Forschungseinrichtungen. So arbeiten an SoMa die Technische Universität Berlin (TUB), die Universität Pisa (UNIP), das Italienische Institut für Technologie (IIT), das Institut für Wissenschaft und Technologie Österreich (IST Austria), die Ocado Group PLC (Ocado) und das Disney Forschungslabor Zürich (DRZ).

All diese Einrichtungen wollen Verhaltensweisen, Reflexe und Ähnliches vom Menschen imitieren, um somit verlässlich flexible Lösungen für unterschiedliche Anwendungen zu entwickeln.

Da nun kurz das Projekt SoMa vorgestellt wurde, wird nun die Aufgabenstellung mit dem erforderlichen Use Case erläutert.

2.2 Aufgabenstellung und Use Case

Bei Ocado handelt es sich um den weltweit größten Online Supermarkt, der in Großbritannien angesiedelt ist. Sämtliche Einkäufe werden nach der Onlinebestellung innerhalb von einer Stunde bis an die Haustür geliefert. Da es sich bei Ocado um einen Online Supermarkt handelt, gibt es auch keine regionalen Filialen, sondern nur große Warenhäuser, in denen die eingehenden Bestellungen bearbeitet werden. In diesen Warenhäusern wird alles über Transportbänder befördert. Wenn ein Objekt auf dem Transportband für eine Bestellung benötigt wird, dann wird der Behälter mit dem Objekt auf ein Nebenband bewegt, um das gewünschte Objekt herauszunehmen und in eine Tüte für die jeweilige

Bestellung hineinzulegen. Anschließend wird der Behälter wieder auf das Hauptförderband bewegt.

Ocado möchte den Verpackern die niedrige und eintönige Arbeit abnehmen und versucht das Verpacken zu automatisieren. Solche Lösungen, zum Verpacken von Objekten, können zum Teil schon mit Serienrobotern realisiert werden. Allerdings sind die dort verwendeten Objekte weder nachgiebig noch unterschiedlich geformt. Die Lösungen mit Serienrobotern funktionieren also ausschließlich bei steifen Körpern mit regulären beziehungsweise vorhersehbaren Geometrien. Wenn man frisches Gemüse oder Obst hernimmt, dann merkt man schnell, dass diese Klasse von Objekt sehr empfindlich ist und somit genau bei den nachgiebigen und beliebig geformten Objekten einzuordnen ist. So wird versucht eine Lösung zu finden, die es ermöglicht Obst und Gemüse zu greifen, ohne dessen Haltbarkeit zu verkürzen. Diese Verkürzung tritt genau dann auf, wenn das Objekt beschädigt oder zerdrückt wird.

Die Aufgabe dieser Bachelorarbeit ist das Erproben von verschiedenen Greifstrategien unter der Benutzung verschiedener unteraktuierter Roboterhände, um nachgiebige Objekte zu greifen. Dazu sollen verschiedene Recherchen zu Greifkonzepten und Greifstrategien durchgeführt werden. Anhand der Recherchen und der experimentellen Vorstudie (Erprobung) sollen dann Kriterien für eine erfolgreiche Greifstrategie aufgestellt werden. Bevor die Vorstudie ausgeführt werden kann, sollen die implementierten Strategien zunächst in einer Simulation validiert werden.

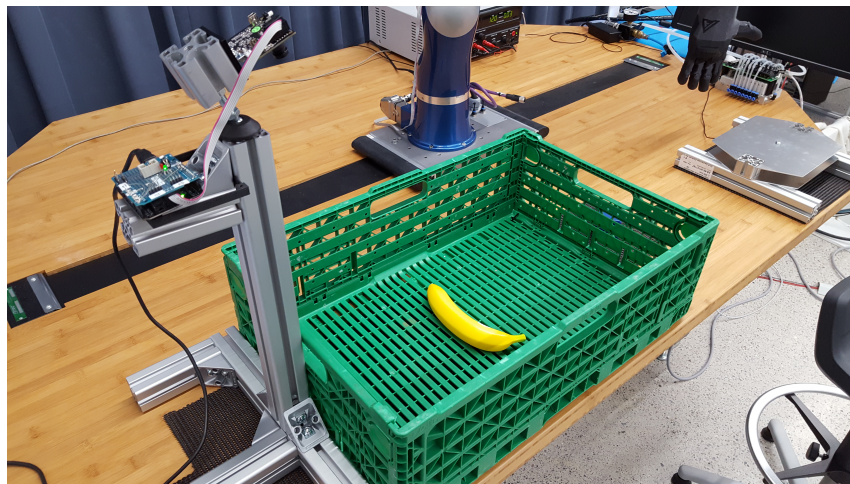


Abbildung 5: Grüner IFCO Behälter. Quelle: eigene Aufnahme

Um die Greifstrategien später in einer realen Umgebung testen zu können, stellt man eine Situation im Online Supermarkt nach. Dabei wird eine Verpackungsstation zum Vorbild genommen, welche durch ein Bildverarbeitungssystem die Position des zu greifenden Objektes erfassen und die Informationen über einen Rechner an den Roboter weitergeben soll. Man versucht anschließend das Objekt mit einer ausgewählten Strategie mittels der Roboterhand zu greifen. Zu Beginn wird allerdings auf die Bildverarbeitung verzichtet und fest positionierte Objekte aus einem IFCO Behälter (s. Abb. 5) gegriffen. Anschließend soll das Objekt auf eine Ablageplatte mit Kraftsensor gelegt werden. Die Überprüfung des Greiferfolges soll zum einen über die LBR Kraft- und Momentsensoren (KMS) und zum anderen über den Kraftsensor (KS) an der Zielposition erfolgen.

Während der Experimente sollen die Anforderungen, die im *Ocado Use Case* festgelegt sind, möglichst eingehalten werden. Der Use Case ist folgend definiert: *Es darf sowohl beim Greifen, als auch beim Loslassen des Objektes kein Schaden am gegriffenen Objekt entstehen. Sei es durch die Hand selbst oder durch Fallenlassen des Objektes. Der Griff muss sicher sein, damit das Objekt transportiert und somit verpackt werden kann.*

Es soll außerdem großen Wert darauf gelegt werden, zu vergleichen, ab wann es sich lohnt die Umwelt als Hilfsmittel zu benutzen. In diesem Fall wird als Umwelt der Boden oder eine Wand des IFCO Behälters bezeichnet.

In diesem Abschnitt wurde die Aufgabenstellung sowie der geforderte Use Case definiert. Als nächstes folgt nun eine Betrachtung des Leichtbauroboters, der für die Umsetzung der Aufgabenstellung benutzt wird.

3 Grundlagen zum Leichtbauroboter LBR

Wenn man von einem Leichtbauroboter (s. Abb. 6) spricht, dann meint man einen Roboter, der für Mobilität und Interaktionen mit unbekannter Umgebung oder dem Menschen ausgelegt ist. Deshalb muss eine solche Applikation auch gewisse Anforderungen erfüllen. Hier sind die Anforderungen an eine Leichtbaukonstruktion mit gutem Verhältnis von Traglast zu Eigengewicht und hohe Bewegungsgeschwindigkeiten - nahe dem 1:1 Verhältnisses des menschlichen Armes - gemeint. Weiter noch verfügen diese Leichtbauroboter über ein ausgeklügeltes mechatronisches Design, welches ihnen durch Integration von Sensoren und Regelungstechnik geschickte und nachgiebige Interaktionen ermöglicht [HAS08].

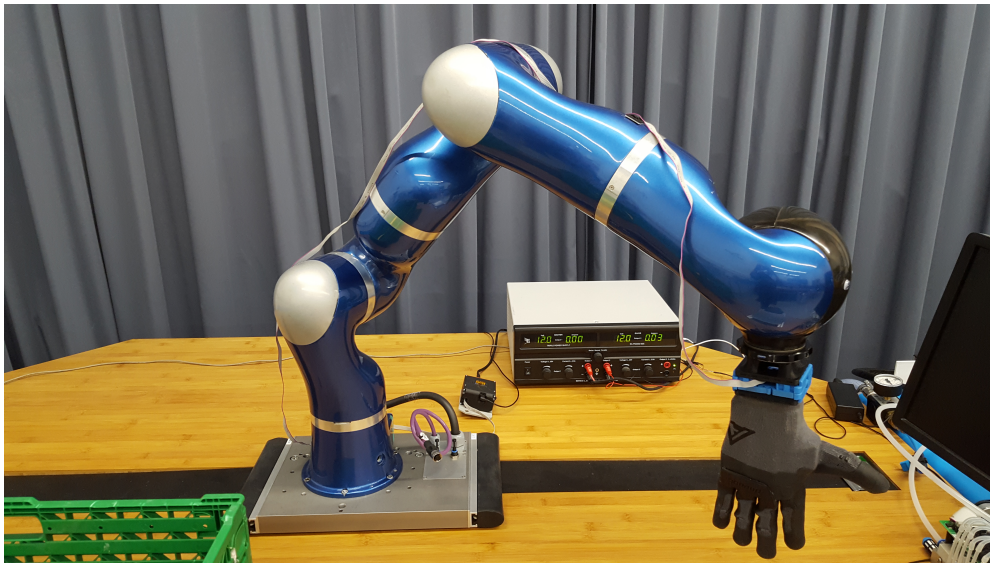


Abbildung 6: Leichtbauroboter LBR III. Quelle: eigene Aufnahme

3.1 Technische Daten

In Tabelle 1 sieht man die technischen Daten des kollaborativen Leichtbauroboter LBR III. Nicht nur das Verhältnis zwischen Nutzlast und Gesamtgewicht (1:1) ermöglichen eine Interaktion mit dem Menschen, sondern auch die sieben Gelenke, die der Roboter besitzt. Mit dieser Anzahl an Gelenken erreicht der Roboter sogenannte Redundanzen. Das bedeutet, dass der LBR einen gewünschten Punkt im Raum mit seinem *Tool Center Point TCP* (Werkzeugmittelpunkt) mit beliebig vielen Gelenkpositionen anfahren kann. Welche Gelenkkonfiguration anschließend gewählt wird und wie durchaus vorkommende Singularitäten vermieden werden, muss programmseitig gelöst werden.

Singularitäten treten bei denjenigen Gelenkkonfigurationen auf, in denen zwei Gelenkachsen des Roboters kollinear zu einander stehen (eine Linie bilden). Im Allgemeinen kann man auch sagen, dass eine Singularität genau dann hervorgerufen wird, wenn ein oder mehrere Freiheitsgrade des Roboters verloren gehen. Wenn beispielsweise Achse Eins und Sechs fluchten, gibt es unendlich viele Gelenkstellungen, die zu exakt der gleichen TCP Position führen. Hier müssten mehrere Achsen mit unendlich hoher Geschwindigkeit gegeneinander bewegt werden, um die gewünschte Position zu erreichen. Dann wird meist

das Auftreten einer solchen Singularität beim Überschreiten einer Höchstgeschwindigkeit von der Robotersteuerung mit einer Fehlermeldung abgebrochen.

Der Leichtbaurobter kann mit seinen Abmessungen Punkte in einem kugelförmigen Arbeitsraum von 936 mm erreichen. Die 48 V Gleichstromversorgung dient dem Ansteuern der Robodrive ILM Motoren und versorgt ebenfalls die integrierte Elektronik, wie unter anderem die Kraft- und Momentsensoren (KMS). Für eine präzise Übersetzung sorgen die Harmonic Drive Getriebe (HDG), die direkt am Motor sitzen. Im Abschnitt 3.2 wird die Funktionsweise des HDG noch einmal kurz aufgenommen und erläutert.

Zu erwähnen ist noch, dass der LBR III dafür entwickelt wurde, um mit der DLR Hand II (s. Abb. 1) menschliche Haptik zu erforschen. Deswegen ist auch die Anzahl und der Typ der Gelenke entsprechend gewählt. Wenn man in Tabelle 1 in die Zeile *Anzahl Achsen* blickt, sieht man die verschieden hintereinander geschalteten Gelenke. So wird zu Beginn mit einer Roll-Knick-Roll Kombination die Schulter und der Oberarm nachgebildet. Anschließend folgt eine Knick-Roll Kombination für Ellenbogen und Unterarm und zum Schluss eine Knick-Knick Kombination (schneidende Achsen) für das Handgelenk [DLR16b].

Parameter	Wert
Gesamtgewicht	14 kg
Max. Nutzlast	15 kg
Verhältnis Nutzlast zu Gesamtgewicht	nahezu 1:1
Max. Gelenkgeschwindigkeit	120°/s
Anzahl Achsen	7 (R - K - R - K - R - K - K)
Max. Reichweite	936 mm
Motoren	Robodrive ILM
Getriebe	Harmonic Drive
Energieversorgung	48 V DC
Regelung	Positions-, Drehmomenten-, Impedanzregelung
Regelzyklus	Strom 40 kHz; Gelenkwinkel 3 kHz; Kartesisch 1 kHz
Elektronik	Integrierte Elektronik, interne Verkabelung, Kommunikation über optischen SERCOS-Bus

Tabelle 1: Technische Daten des LBR III. Quelle: [DLR16b]

3.2 Mechatronisches Design

Aus den technischen Daten kann man ablesen, dass die Hauptziele des Designs, nämlich die Erstellung eines Manipulators mit kinematischer Redundanz ähnlich zum menschlichen Arm und ein nahezu 1:1 Verhältnis von maximaler Nutzlast zu Gesamtgewicht, sehr gut umgesetzt sind [LASH⁺07].

Wichtig für das mechatronische Design ist die Leichtbauweise des Roboters. So werden beispielsweise Leichtbaumetalle oder Verbundwerkstoffe für die Verkleidung des LBR III (Carbon Fibre robot link) - zu sehen in Abb. 7 - verwendet. Auch die restlichen Felder des kompletten Systems, wie Regelung und Energieversorgung (Power Supply), sind vollständig an die Gewichtsreduzierung angepasst. Daraus folgt, dass auch die Trägheiten geringer

sind und sich somit ein geringerer Energieverbrauch einstellt. Die Elektronik ist komplett in den Roboterarm integriert, um störende Kabel an der Außenseite zu vermeiden. Ebenfalls im Arm sitzen die vom DLR entwickelten RoboDrive Motoren (DLR RoboDrive with Safety Brake and Position Sensor), die sich durch Erzielung hoher Momente bei angemessener Geschwindigkeit, geringen Energieverlust und schnelle dynamische Reaktion auszeichnen. Um die Bewegungen so präzise wie möglich auszuführen, wurden Harmonic Drive Getriebe (Harmonic Drive Gear Unit) in jedem Gelenk verbaut. Dort befinden sich ebenfalls Sensoren, die eine vollständige Zustandsmessung ermöglichen. Deshalb kann am LBR III zusätzlich zur Positionsabtastung (Link Position Sensor) auch eine Abtastung der Momente (Torque Sensor with digital interface) vorgenommen werden, um nachgiebiges Verhalten zu implementieren [HAS08].

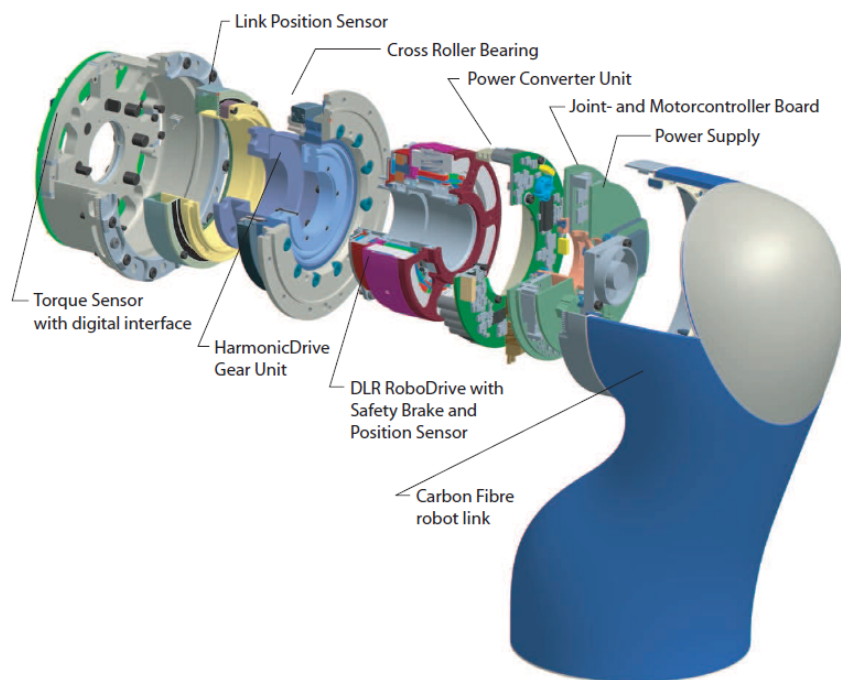


Abbildung 7: Mechatronisches Design. Quelle: [LASH⁺07]

Als nächstes wird auf die Funktionsweise des Harmonic Drive Getriebes eingegangen. Für die Erklärung eignet sich ein PDF Dokument [Höl13], welches auf der Harmonic Drive AG Internetseite zu finden ist. Hier wird innerhalb eines Interviews die Funktionsweise beschrieben.

„Dieses Getriebe besteht aus drei Bauteilen: dem äußeren Circular Spline, einem zylindrischen Ring mit Innenverzahnung, dem mittleren Flexispline, einer zylindrischen, verformbaren Stahlbüchse mit Außenverzahnung sowie dem inneren Wave Generator, einer elliptischen Stahlscheibe mit zentraler Nabe und aufgezogenem elliptisch verformbaren Spezialkugellager. Der elliptische Wave Generator als angetriebenes Teil verformt über das Kugellager den Flexspline, der sich in den gegenüberliegenden Bereichen der großen Ellipsenachse mit dem innenverzahnten, fixierten Circular Spline im Eingriff befindet. Mit Drehen des Wave Generators verlagert sich die große Ellipsenachse und damit der Zahneingriffsbereich. Da der Flexspline zwei Zähne weniger als der Circular Spline besitzt,

vollzieht sich nach einer halben Umdrehung des Wave Generators eine Relativbewegung zwischen Flexspline und Circular Spline um einen Zahn und nach einer ganzen Umdrehung um zwei Zähne. Bei fixiertem Circular Spline dreht sich der Flexspline als Abtriebsselement entgegengesetzt zum Antrieb“[Höl13].

Man sieht die Komponenten des Harmonic Drive Getriebes in Abb. 8. Hier erkennt man die oben erklärten Eigenschaften der einzelnen Bauteile: Den *Circular Spline* mit seiner zylindrischen Ringform mit Innenverzahnung und den verformbaren *Flexspline*, der in der Mitte der Abbildung zu sehen ist. Dieser ist als zylindrische Stahlbüchse mit Außenverzahnung aufgebaut. Abschließend erkennt man auch den *Wave Generator* rechts außen. Durch das Zusammenspiel dieser Komponenten, kann die oben erklärte Funktionsweise erreicht werden.



Abbildung 8: Bauteile Harmonic Drive Getriebe. Quelle: [Höl13]

Da nun bereits ein guter Überblick über die Hardware Komponenten eines Leichtbauroboters gegeben wurde, wendet man sich nun den regelungstechnischen Lösungen zu. Die Nachgiebigkeit, die oben bereits erwähnt wurde, kann über die Regelungskonzepte realisiert werden. Im Folgenden werden nun verschiedene Regelungstypen vorgestellt, darunter auch der Typ, der für die Vorstudie verwendet wird.

3.3 Regelungskonzepte

Dieses Unterkapitel fokussiert die Regelungskonzepte des verwendeten Leichtbauroboters, vor allem in Bezug auf den Arbeitsraum nahe des Menschen und in unstrukturierter Umgebung. Deshalb wird das Abtasten von Kräften und Momenten immer essentieller, um Bewegungsgenauigkeiten zu verbessern, genauso wie die direkte Anzeige und Regelung von einwirkenden Kräften zu ermöglichen. Somit können Kollisionen auf der kompletten Armstruktur mit Hilfe der in den Gelenken verbauten Kraft- und Momentensensoren detektiert werden. Im Folgenden wird zunächst die Basisfunktionalität *Gelenkwinkel Regelung* und im Anschluss die für die MRI verwendete *Kartesische Impedanz Regelung* erläutert [LASH⁺07].

Gelenkwinkelregelung (Joint Level Control)

Das einfachste Regelungskonzept, um einen Roboter zu steuern, heißt Gelenkwinkelregelung (Joint Level Control). Hier bekommt der Roboterarm - man spricht auch von *Manipulator* - keine Informationen über seine Umgebung oder extern einwirkende Kräfte, die an seinen Gelenken und Gliedern auftreten. Das allgemeine Prinzip der *Joint Level Control* ist es, den aktuellen Gelenkwert q über die Positionssensoren an der Abtriebsseite des Gelenkes zu erfassen. Der gemessene Wert von q wird anschließend in einer Rückführung mit der gewünschten Gelenkposition q_d verglichen. Dieses Prinzip ist auch in Abb. 9 zu sehen.

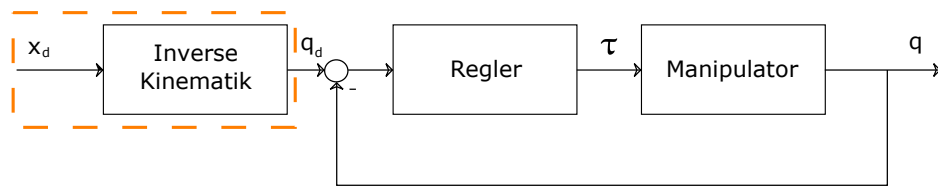


Abbildung 9: Blockdiagramm Joint Level Control. Quelle:

Der Regler liefert dann ein Moment τ , welches den Roboter in die gewünschte Position bewegt. Wenn man zusätzlich noch den orangenen Kasten betrachtet, kann man eine Erweiterung des Blockdiagramms feststellen.

Hier wird als Eingangsgröße eine gewünschte Position im Raum festgelegt. Über die Inverse Kinematik können anschließend die passenden Gelenkwinkel des Roboters berechnet werden. Diese werden wieder mit den aktuellen Gelenkwinkeln verglichen und ausgeglichen. So kann man die Regelabweichung zwischen q_d und q dem Regler als Eingangsgröße übergeben. Der Regler errechnet dann das passende Moment τ , welches den Roboter in die gewünschte Gelenkposition q_d oder gewünschte kartesische Position x_d bringt.

Joint Level Torque and Position Control

Für diese Art von Regelung wird ein Regler hergenommen, der den kompletten Gelenkzustand in einer Feedback Schleife zurückgeführt bekommt. Dieser wird auch *state feedback controller* also zustandsrückführender Regler genannt. Wenn man vom kompletten Gelenk Zustand spricht, ist die Motorposition θ , die Motorgeschwindigkeit $\dot{\theta}$, genauso wie das Gelenkmoment τ und seine Ableitung $\dot{\tau}$ gemeint [LASH⁺07].

Abbildung 10 zeigt das für Momenten- und Positionsregelung verwendete Schema. θ_d beschreibt hierbei die gewünschte Gelenkposition und τ_d das gewünschte Moment, das am Gelenkabtrieb wirken soll (s. Abb. 7, *Torque Sensor with digital Interface*). Die Größe D beschreibt die Dämpfung, die am flexiblen Gelenk wirken soll und K die Gelenksteifigkeit. Mit B bezeichnet man das Trägheitsmoment des angrenzenden neuen Verbindungsgliedes nach dem Gelenk.

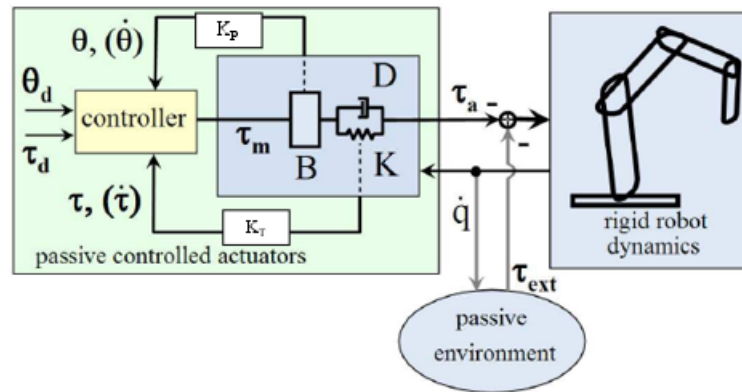


Abbildung 10: Regelungsschema für Momenten- und Positionsregelung. Quelle: [LASH⁺07] (bearbeitet)

Wenn man die Verstärkungsfaktoren der Rückführungen (K_P , K_T) passend einstellt, dann kann dieses Schema zu verschiedenen Regelungsstrategien führen. Man kann mit einem großen Verstärkungsfaktor von K_T , einem Faktor von Null bei K_P und einer positiven Geschwindigkeitsrückführung \dot{q} eine Momentenregelung realisieren. Ebenfalls kann eine Positionsregelung realisiert werden, indem man nun K_T auf Null setzt und K_P mit einem großen Wert ansetzt [LASH⁺07].

Es gibt aber auch noch eine weitere Besonderheit beim LBR III. Der Roboter kann nämlich in eine *zero gravity mode*, in der die Motoren das eigene Robotergewicht kompensieren, gebracht werden. In diesem Modus kann der Roboterarm sehr einfach von einem Menschen bewegt werden, um ihm Bewegungsbahnen oder bestimmte Punkte beizubringen (*Teachen*). Dieser Modus kann unter Einsatz der Kartesischen Impedanz Regelung erzielt werden.

Kartesische Impedanz Regelung (Cartesian Impedance Control)

Während Anwendungen, bei denen der Roboter überwiegend in Kontakt mit seiner Umgebung steht, ist es sinnvoller Kräfte anstatt Positionen in kartesischen Richtungen zu regeln. Ein geeignetes Regelungskonzept bietet hier die kartesische Impedanz Regelung, welche aus einer spezifizierten Beziehung der Kraft- und Positionsregelung mit einer nominal gewünschten Position realisiert ist. Man spricht hier von Steifigkeit und Dämpfung.

Mit der physikalischen Interpretation der Momente und Positionen kann eine kartesische Nachgiebigkeit implementiert werden. Das passiert unter der Benutzung des *Joint Level Torque Controller* (s. Abb. 10), der das Trägheitsmoment des Motors und dessen Reibung kompensiert und durch Ersetzen der Gelenksteifigkeit mit einer virtuellen kartesischen Feder (Impedanz Gesetz). Die gewünschte Position des TCP und die Steifigkeit K werden

über die Gelenkposition q spezifiziert. Dazu wird ein geschätztes $\bar{q}(\theta)$ für die Gelenkposition q errechnet, welches nur auf der Motorposition θ und der Gelenksteifigkeit beruht. Die Vorwärtskinematik $x(\bar{q})$, die Jacobi-Matrix $J(\bar{q})$, die Schwerkraftmomente $g(\bar{q})$ und das Impedanz Gesetz werden alle anhand des geschätzten Wertes $\bar{q}(\theta)$ errechnet. Dadurch ergibt sich ein passives Teilsystem, zu sehen in Abb. 11 [LASH⁺07].

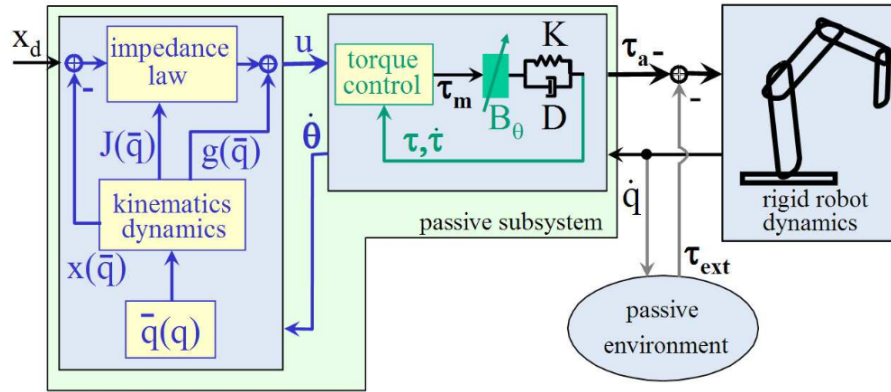


Abbildung 11: Regelungsschema für Kartesische Impedanz Regelung. Quelle: [LASH⁺07]

Gewünschte Kontaktkräfte können also indirekt durch eine gewünschte Position und durch Einstellen einer bestimmten Steifigkeit erreicht werden. Ein anderer Weg wäre es, direkt die Kontaktkraft zu übergeben, um damit aus der Transformation mit der Jacobi-Matrix ein gewünschtes Gelenkmoment zu erhalten.

Die virtuelle Feder, die zuvor schon einmal erwähnt wurde, kann im Grunde genommen als Feder am TCP des Endeffektors beschrieben werden. So wird im Impedanz Gesetz das Hooke'sche Federgesetz angewendet [LASH⁺07]:

$$F = K_x \tilde{x}(\theta) \quad (1)$$

Hier beschreibt \tilde{x} die Abweichung zwischen dem gesetzten Punkt und der aktuellen Position des TCP. K_x beschreibt die Federsteifigkeit. Die ausgelenkte Feder kann somit eine Kraft in Richtung des gewünschten Punktes ausüben, sodass sich der Roboter in diese vordefinierte Position bewegt.

Im Abschnitt Regelungskonzepte konnten nun drei Konzepte aufgezeigt und erläutert werden. Im Folgenden werden nun Anwendungsbereiche vorgestellt, in denen Leichtbauroboter mit solchen Regelungskonzepten eingesetzt werden.

3.4 Anwendungsbereiche

Die Anwendungsbereiche eines Leichtbauroboters sind sehr weit gestreut. Man kann allgemein vier große Themenbereiche benennen, um die verschiedenen Anwendungen zu kategorisieren. Ein großer Bereich, der in Zukunft noch mehr an Zuwachs erfahren wird, ist der Bereich der Servicerobotik (SR). Wie schon in Abschnitt 1 beschrieben, wird dieser Teil der Anwendungsbereiche auch als Assistenzrobotik (AR) bezeichnet und kommt zum Beispiel in der Industrie zum Einsatz. Diese Roboter arbeiten entweder in unmittelbarer Umgebung zum Menschen oder kooperieren direkt mit ihm, wie in Abb. 2 zu sehen.

Im selben Abschnitt wird der zweite Bereich der SR erläutert, nämlich der im häuslichen oder öffentlichen Umfeld. Hier werden die Leichtbauroboter hergenommen, um Menschen im eigenen Haus, Krankenhaus oder in Einkaufsläden zu unterstützen. Eine robotische Hilfe, die vom DLR entwickelt wurde, kann man in Abb. 3 sehen. Diese wird über das menschliche Gehirn gesteuert und bietet die Möglichkeit einen am Rollstuhl befestigten LBR zu bewegen. [HAS08].



Abbildung 12: Space Justin. Quelle: [Sca15]

Ein weiteres großes Einsatzgebiet zeigt sich im Bereich der Weltraumrobotik. Hier werden allerdings sehr hohe Anforderungen an Mobilität und Autonomie gestellt. Auch die Temperaturverhältnisse und die damit benötigte Temperaturreistenz spielen eine wichtige Rolle im Bezug auf diesen Bereich. In Abb. 12 kann man den humanoiden Roboter *Space Justin* betrachten. Dieser kann mit Hilfe eines kraftsensiblen Joysticks telemanipuliert werden und gehört in diesem Fall nicht zu den autonomen Systemen. In dem vom DLR bearbeiteten Projekt *Kontur 2* wurde dieser Joystick, dessen Entwicklung die Hauptaufgabe des Projektes darstellte, auf die Internationale Raumstation ISS gebracht. Von dort aus wurde anschließend der Roboter *Space Justin* gesteuert. Man verwendet diese Technologie, um die Außeneinsätze von Astronauten im Weltraum zu verringern - im besten Fall komplett zu vermeiden. Denn Weltraumspaziergänge sind nicht nur sehr gefährlich, sondern auch extrem teuer [ABR⁺16].

Ein weiterer Anwendungsbereich des LBR lässt sich in das Gebiet Medizinrobotik einordnen. Hier werden die Roboter eingesetzt, um einen Chirurgen in puncto Präzision bei einem Eingriff zu unterstützen. Als Beispiel kann man hier einen anderen Leichtbauro-

boter des DLR hernehmen, nämlich den DLR *MiroSurge*, der in Abb. 13 abgebildet ist. [KHN⁺09]



Abbildung 13: DLR MiroSurge. Quelle: [KHN⁺09]

Abschließend kann man noch den Bereich der Telepräsenz nennen. Hier wird oft von den Begriffen Kraftfeedback und virtuelle Realität gesprochen. Allerdings können diese schon wieder als eigene Themengebiete hergenommen werden. Das beste Beispiel für eine solche Anwendung ist das *DLR Haptic User Gerät HUG*, welches in Abb. 14 zu sehen ist. Dieses Interaktionsgerät wird überwiegend für die effiziente Telemanipulation von robotischen Systemen benutzt. Es wird aber auch für die Interaktion mit komplexen virtuellen Welten eingesetzt. Ziel ist es, auftretende Kräfte so realistisch wie möglich, als Feedback, an den Menschen weiterzugeben. Das HUG besteht aus zwei Leichtbaurobotern, die den Arbeitsraum der menschlichen Arme fast vollständig abdecken. Für die Sicherheit wurden mehrschichtige Sicherheitsarchitekturen mit optimierten Regelungsstrategien kombiniert. Dadurch lässt sich eine zuverlässige, robuste und intuitive Bedienung für den Menschen realisieren. Das Interaktionsgerät kommt bei der Telemanipulation von Space Justin, bei der Montagesimulation virtueller Prototypen, beim Astronautentraining und bei Rehabilitationen zum Einsatz [HSA⁺08].



Abbildung 14: DLR Haptisches Interaktionsgerät HUG. Quelle: [HHK⁺11]

In diesem Kapitel konnte ein guter Einblick über den Leichtbauroboter mit seinen technischen Informationen vermittelt werden. Bevor nun aber der Roboter programmiert werden kann, müssen im nächsten Teil der Arbeit erst einmal Recherchen zu Greifvarianten in der Literatur angestellt werden.

4 Literaturrecherche zu Greifvarianten

Eines der aktuellsten Forschungsthemen im Bereich der Robotik ist das Greifen oder im Allgemeinen das Manipulieren von Objekten. Humanoide Roboterhände werden unter dem richtigen Einsatz von Greifvarianten und -strategien zum „Multi-Tool“ [RS15].

Dem erfolgreichen Einsatz von Robotern mit sogenannten *multifingered robot hands* in Alltagssituationen steht allerdings noch ein langer Weg bevor. Dennoch gibt es in diesem Bereich unzählige Veröffentlichungen, bei denen es um die vorher angesprochen Greifvarianten und um Qualitätskriterien von Griffen geht. Ebenfalls beschäftigen sich einige Wissenschaftler mit der Erforschung des menschlichen Greifverhaltens und dem Versuch der Implementierung dieser intuitiven Entscheidungen.

In diesen Studien geht es nicht wirklich darum den Menschen in seinem Verhalten zu imitieren, sondern viel mehr darum die Beziehung zwischen den Anforderungen einer Aufgabe und der Greiflösung zu verstehen. Für eine

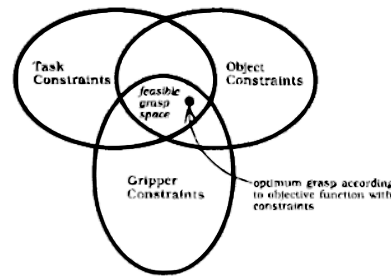


Abbildung 15: Schnittmenge (feasible Grasps) der festgelegten Bedingungen. Quelle: [Cut89]

Anwendung in der Robotik spiegeln sich genau drei Bedingungen (s. Abb. 15) für eine Greifentscheidung nieder. So überlappen sich die drei Bedingungen *Aufgabe* (Task Constraints), *zu greifendes Objekt* (Object Constraint) und *Greifwerkzeug* (Gripper Constraints) in einer Schnittmenge „realisierbarer Griffe“ [Cut89].

Je nach Situation entscheidet man sich also intuitiv nach diesen drei Punkten. So wird beispielsweise ein Stift zum Schreiben anders gehalten als wenn man ihn einer Person überreicht. Um später die verschiedenen Greifvarianten besser erläutern zu können, werden nun die von Thomas Feix und Thea Iberall benutzten virtuellen Finger (VF) eingeführt.

4.1 Definition der virtuellen Finger

In vielen Greifaufgaben arbeiten mehrere Finger als eine funktionale Einheit zusammen. Diese Einheit wird von Feix als virtueller Finger definiert. So lassen sich diejenigen Finger zu einem VF zusammenfassen, die Kräfte in gleicher Richtung - als Einheit - auf das Objekt ausüben. Je nach Greifvariante (s. Abschnitt 4.2) können zu einem VF einer bis vier Finger oder auch Handteile, wie zum Beispiel Handfläche und -ballen, gehören. Feix nummeriert die Finger beginnend mit dem Daumen durch. So bekommt der Daumen folglich die Eins, der Zeigefinger (Index) die Zwei, der Mittelfinger die Drei, der Ringfinger die Vier und der kleine Finger die Fünf.

Bei einem ausgeführten Griff muss das Objekt von mindestens zwei VF, die sich wie in den Beispielen in Abb. 16 gegenüberstehen, gehalten werden. So als wäre es ein simpler Greifer oder ein Schraubstock. In Abb. 16 sieht man drei grundlegende Richtungen relativ zum Handkoordinatensystem unter (d), in denen die Hand Kräfte auf das Objekt ausüben kann, um es so sicher zu halten. Dabei unterscheiden sie sich in der Art und Weise der Kraftrichtung, die zwischen Hand und Objekt wirkt. Man spricht hier von sogenannten *Opposition Types* [Ibe87][FRS⁺16a].

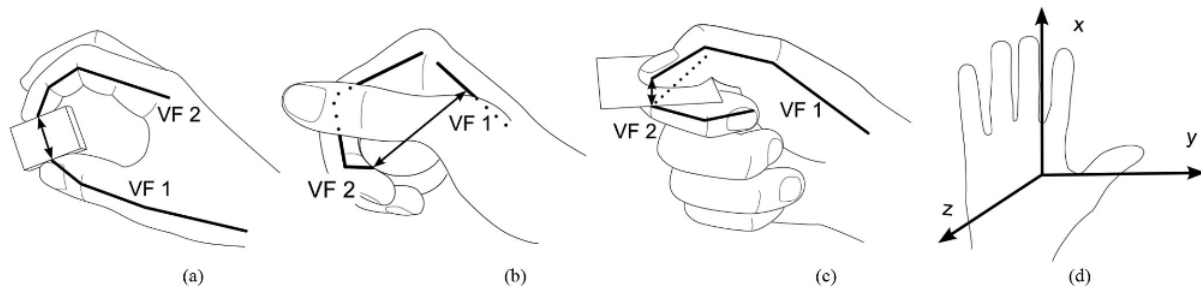


Abbildung 16: Gegenspielerarten (Opposition Types) einer greifenden Hand: (a) Pad Opposition (b) Palm Opposition (c) Side Opposition (d) Hand Coordinate System. Quelle: [FRS⁺16a]

Eine sogenannte **Pad Opposition** unter (a) tritt dann auf, wenn die Kraftrichtung der VF, die auf das Objekt ausgeübt werden, parallel zur Handfläche verlaufen. Diese muss demnach auf oder parallel der x-Achse des Handkoordinatensystems unter (d) sein. Die Kraftrichtung wird im Folgenden nun auch als Kraftlinie bezeichnet. Als Beispiel für eine *Pad Opposition* kann man sich das Halten einer Nadel oder eines kleinen Balles vorstellen [Ibe87][FRS⁺16a].

Ein anderer *Opposition Type* ist die **Palm Opposition** unter (b). Dieser Fall tritt dann auf, wenn die gedachte Kraftlinie zwischen den VF senkrecht zur Handfläche steht. Diese verläuft somit auf oder parallel der z-Achse des Handkoordinatensystems unter (d). Die Richtung der z-Achse zeigt aus dem Blatt heraus. Eine Vorstellung für diesen *Opposition Type* bekommt man, wenn man zum Beispiel einen Hammer oder einen Schraubenzieher greift [Ibe87][FRS⁺16a].

Der dritte und letzte Typ ist die sogenannte **Side Opposition** unter (c). Dieser *Opposition Type* tritt vor allem dann auf, wenn man beispielsweise einen Schlüssel zum Aufschließen benutzt oder beim Lesen ein Buch in einer Hand hält. Die entstehende Kraftlinie verläuft hier auf oder parallel zur y-Achse unter (d). In Bezug auf die Handfläche verläuft sie nach Feix transversal, also schräg [Ibe87][FRS⁺16a].

4.2 Griffdefinition und Greifvarianten (Types of Grasps)

Nach Feix ist ein Griff jede ruhende Handstellung, mit der ein Objekt sicher in einer Hand gehalten werden kann, unabhängig von der Handorientierung. Dabei muss zu jeder Zeit Stabilität garantiert sein, egal in welche Richtung die relativen Kräfte zwischen Hand und Objekt wirken. Gemeint ist damit, dass der Griff sämtlichen Kräften, egal ob dessen Richtung oder Größenordnung, standhalten muss [FRS⁺16b].

Im Folgenden werden die verschiedenen Greifvarianten anhand des Schemas (Abb. 17), welches von Mark Cutkosky [Cut89] definiert wurde, vorgestellt. Die darin enthaltenen Griffe fallen in die Griffdefinition nach Feix [FRS⁺16b].

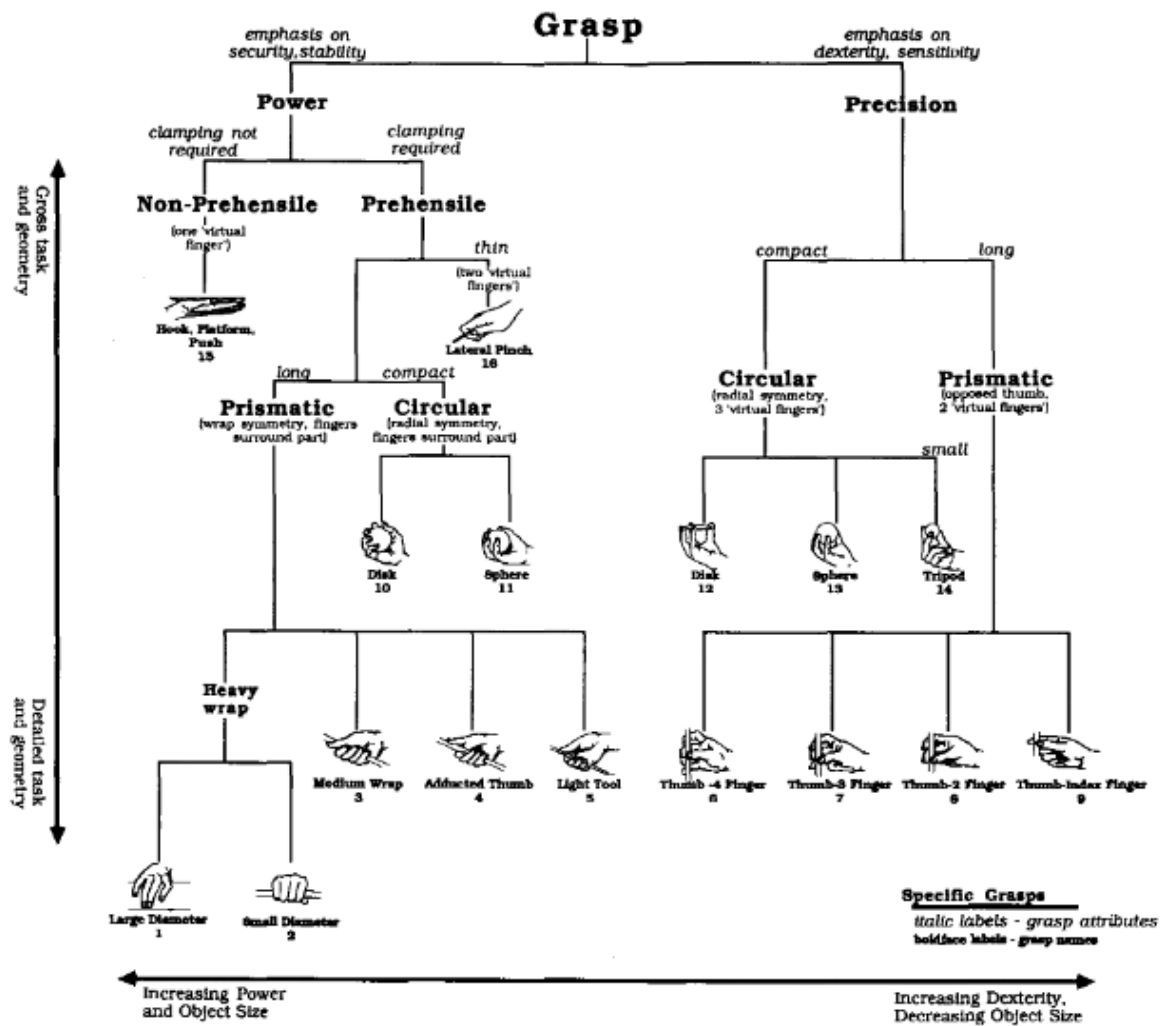


Abbildung 17: Greifvarianten nach Cutkosky. Quelle: [Cut89]

Das Schema stellt eine Baumstruktur dar, in der die verschiedenen Greifvarianten hierarchisch geordnet sind. So entspringen alle Greifvarianten aus den zwei Wurzelkategorien *Power* und *Precision Grasps*.

Bei einem Power Grasp stehen vor allem Sicherheit und Stabilität an oberster Stelle. Es wird versucht dem Objekt sämtliche Bewegungsmöglichkeiten zu entziehen. Man macht das Objekt immobil. Beim Precision Grasp stehen hingegen Geschicklichkeit und Sensitivität im Vordergrund. Das Objekt kann somit - auch bei bereits erfolgten Griff - durch

den Endeffektor nochmals manipuliert werden, was bei einem Power Grasp nicht möglich wäre.

Wenn man auf die Kategorie Power Grasp blickt, teilt sich der Zweig in *Non-Prehensile* (nicht zum Greifen geeignet) und *Prehensile* (zum Greifen geeignet) auf. Dabei muss abgewägt werden, ob das Objekt festgeklemmt werden soll. Falls *clamping* (Festklemmen) erforderlich ist, wechselt man in den Zweig *Prehensile*.

Im anderen Fall konzentriert man sich auf den Ast *Non-Prehensile*. In diesem Ast befindet sich die Greifvariante Nummer fünfzehn. Die Handpose findet man oft bei Kellnern, die ein Tablett mit ihrer gesamten Handfläche tragen. Der Griff fällt allerdings nicht in die Definition nach Feix, da bei Auftritt von externen Kräften das Objekt von der Handfläche fallen würde. Hierfür wird der von Feix definierte Griff *Extension Type* hergenommen, welcher in Abb. 18 zu erkennen ist und zur Wurzelkategorie *Power* gehört. Dieser Griff ist jetzt in der Unterkategorie *Prehensile* einzuordnen.

Wenn man nun im Ast *Prehensile* weiter geht, wird eine Unterscheidung der Objektgeometrie getroffen. So kann das Objekt *thin* (dünn), *compact* (kompakt) oder *long* (lang) sein. Will man ein längliches Objekt greifen, ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass es sich um einen zylindrischen Gegenstand handelt. Hier wechselt man also in den Zweig *Prismatic*. Bei einem kompakten Objekt wechselt man in die Einteilung *Circular*. Diese beiden Kategorien treten auch in der Wurzelklasse *Precision* auf. Hier wird wieder zwischen einem *compact* (kompakten) und einem *long* (länglichen) Objekt unterschieden. So blickt man bei einem Objekt mit der Eigenschaft *compact* in den Teilast *Circular*. Bei einem länglichen Gegenstand wiederum in die Kategorie *Prismatic*.

Je weiter man von oben nach unten durch die Hierarchie der Greifvarianten geht, desto detaillierter werden die Objektgeometrie und die Aufgabe, die mit dem Griff erledigt werden kann. Und je weiter man von links nach rechts in dem Schema vorgeht, desto mehr verbessert sich die Geschicklichkeit der Greifvariante, aber umso geringer wird die Objektgröße, die gegriffen werden kann.



Abbildung 18: Griff 18: Extension Type Grasp. Quelle: [FREK]

Wie man in Abb. 18 erkennen kann, wird das Objekt hier zwischen dem Daumen und den restlichen Fingern eingeklemmt. So lässt sich sagen, dass das Objekt von zwei VF eingeklemmt ist, da die Finger zwei bis fünf Kräfte in dieselbe Richtung ausüben und der Daumen eine Kraft in die entgegengesetzte Richtung ausübt. Die gedachte Kraftlinie zwischen den beiden virtuellen Finger ist somit parallel zur Handfläche. In diesem Fall handelt es sich um eine *Pad Opposition* (s. Abschnitt 4.1). Man verwendet den *Extension Type Grasp* beispielsweise um einen Teller zu tragen [FRS⁺16a].



Abbildung 19: Griff 16: Lateral Pinch Grasp. Quelle: [FREK]

In Abb. 19 erkennt man den *Lateral Pinch Grasp*, der zur Kategorie *Power*→*Prehensile* gehört. Hier wird das Objekt zwischen Daumen und dem seitlichen Teil des Zeigefingers eingeklemmt. Dieser Griff wird verwendet, um jemandem eine Visitenkarte oder Ähnliches zu überreichen. Hier hat man als ersten VF den Daumen und als zweiten VF den seitlichen Teil Zeigefingers. Die Kraftlinie verläuft transversal oder schräg zur Handfläche und lässt sich so als *Side Opposition* bestimmen (s. Abschnitt 4.1).



Abbildung 20: Griff 10: Power Disk Grasp. Quelle: [FREK]

Als nächstes wird der von Cutkosky definierte *Power Disk Grasp* betrachtet (s. Abb. 20), der in die Kategorie *Power*→*Prehensile*→*Circular* einzuordnen ist. Dieser kann verwendet werden um beispielsweise eine CD fest zu umschließen. So wird die CD von der Handfläche und den restlichen vier Fingern festgehalten. Man teilt hier den ersten VF der Handfläche und den zweiten VF den Fingern zwei bis fünf zu. Die Kraftlinie, die zwischen den beiden VF aufgespannt wird, lässt sich der *Palm Opposition* zuordnen (s. Abschnitt 4.1). Sie steht dementsprechend senkrecht auf der Handfläche.



Abbildung 21: Griff 11: Power Sphere Grasp. Quelle: [FREK]

Nun wird der Griff *Power Sphere* (s. Abb. 21), der nach *Power*→*Prehensile*→*Circular* kategorisiert ist, betrachtet. Hier wird zum Beispiel ein Ball in der Hand gehalten. Die

Hauptrolle in diesem Griff spielen die Handfläche (VF1) und die Finger zwei bis fünf (VF2). Die entstehende Kraftlinie steht hier senkrecht auf der Handfläche. Man spricht von der *Palm Opposition* (s. Abschnitt 4.1).



Abbildung 22: Griff 3: Medium Wrap Grasp. Quelle: [FREK]

In Abb. 22 erkennt man als nächstes den Griff *Medium Wrap*, der in die Kategorie *Power*→*Prehensile*→*Prismatic* eingeteilt ist. Hier wird ein zylinderförmiges Objekt (zum Beispiel ein Staffelstab, eine Wasserflasche) zwischen den Fingern zwei bis fünf und der Handfläche eingeschlossen. Der VF1 umfasst somit die Finger zwei bis fünf und der VF2 ist die Handfläche. Die Kraftlinie, die senkrecht zur Handfläche auftritt, lässt auf eine *Palm Opposition* schließen (s. Abschnitt 4.1).



Abbildung 23: Griff 4: Adducted Thumb Grasp. Quelle: [FREK]

Der nächste Griff ist der *Adducted Thumb* (s. Abb. 23), der in derselben Kategorie wie der *Medium Wrap Grasp* angesiedelt ist. Der Griff stellt eine Alternative zum vorherigen Griff dar und besitzt drei VF. Der VF1 beinhaltet die Handfläche, der VF2 die Finger zwei bis fünf und der VF3 ist der Daumen. Als *Opposition Type* kann hier die *Palm Opposition* angesetzt werden, da die Kraftlinie senkrecht auf der Handfläche steht (s. Abschnitt 4.1).

Der Daumen wird als *adducted* beschrieben. Das bedeutet, dass der Daumen angezogen oder auch abgespreizt wird, um das Objekt noch weiter zu stabilisieren. Durch das Abspreizen bilden die Handfläche und der Daumen im Grunde genommen eine Einheit (VF). Dies wird hier aber von Feix anders definiert. Der Daumen wird demnach als zusätzlicher VF (3) und nicht als Bestandteil des VF2 gesehen.



Abbildung 24: Griff 5: Light Tool Grasp. Quelle: [FREK]

Anschließend wird der Griff *Light Tool* angeschaut (s. Abb. 24). Dieser ist ebenfalls in die Kategorie *Power*→*Prehensile*→*Prismatic* eingeordnet. Hier wird ein dünner Zylinder mit Hilfe der Handfläche, den Fingern zwei bis fünf und Wahlweise dem Daumen festgehalten. So ist der VF1 die Handfläche, der VF2 die Finger zwei bis fünf und optional der VF3 der Daumen, denn kleine zylinderförmige Objekte können auch ohne Daumen gegriffen werden. Die Kraftlinie steht senkrecht zur Handfläche und lässt sich somit als *Palm Opposition* definieren (s. Abschnitt 4.1).

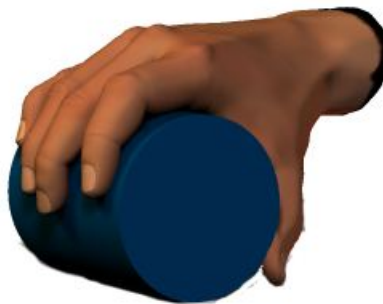


Abbildung 25: Griff 1: Large Diameter Grasp. Quelle: [FREK]

Nun kann man in Abb. 25 den *Large Diameter Grasp* erkennen, der zur Kategorie *Power*→*Prehensile*→*Prismatic*→*Heavy Wrap* gehört. Hier wird ein zylinderförmiges Objekt mit großem Durchmesser in der Hand gehalten. Nach Feix spielen hier die Handfläche (VF1) und die Finger zwei bis fünf (VF2) die Hauptrolle im Griff. So entsteht eine gedachte Kraftlinie zwischen dem VF1 und VF2, die senkrecht zur Handfläche steht. Man spricht in diesem Fall wieder von einer *Palm Opposition* (s. Abschnitt 4.1).



Abbildung 26: Griff 2: Small Diameter Grasp. Quelle: [FREK]

Der Griff *Small Diameter* (s. Abb. 26) unterscheidet sich vom vorherigen Griff nur im Durchmesser. Er besitzt also dieselben VF und hat denselben *Opposition Type*, der wieder durch die senkrechte Kraftlinie zur Handfläche bestimmt werden kann (s. Abschnitt 4.1).



Abbildung 27: Griff 12: Precision Disk Grasp. Quelle: [FREK]

Als nächstes kommt der von Cutkosky definierte *Precision Disk Grasp* (s. Abb. 27). Man wechselt also im Schema (s. Abb. 17) in die Wurzelklasse *Precision*. Anschließend folgt eine Unterscheidung des Objektes in *compact* (massiv) und *long* (lang). Wenn man dem Zweig *compact* folgt, kommt man zum Teilstab *Circular*, wie bereits schon einmal bei der Erklärung der Baumstruktur erläutert. Hier wird nun der anfangs genannte Griff 12 angeschaut. Man kann sehen, dass beispielsweise eine CD mit den Fingerspitzen präzise gehalten werden kann. Der Daumen und die Finger zwei bis fünf arbeiten zusammen und werden dementsprechend eingeteilt. Der Daumen wirkt hier als VF1 und die restlichen Finger als VF2. Die Kraftlinie zwischen den VF verläuft parallel zur Handfläche und lässt sich somit als *Pad Opposition* definieren (s. Abschnitt 4.1).



Abbildung 28: Griff 13: Precision Sphere Grasp. Quelle: [FREK]

Nun wird der Griff *Precision Sphere*, der auch in Feixs Definition passt in Abb. 28 betrachtet. Dieser befindet sich in $Precision \rightarrow compact \rightarrow Circular$. Hier kann man sich vorstellen, dass zum Beispiel ein Golfball mit den Fingerspitzen gehalten wird. Die Hauptarbeit verrichten in diesem Griff wieder der Daumen (VF1) und die Finger zwei bis fünf (VF2). Die Kraftlinie steht wieder parallel zur Handfläche, sodass eine *Pad Opposition* festgestellt werden kann (s. Abschnitt 4.1).



Abbildung 29: Griff 14: Tripod Grasp. Quelle: [FREK]

In Abb. 29 sieht man den *Tripod Grasp*, der im Teilst *Circular* nochmal eine Unterkategorie besitzt ($Precision \rightarrow compact \rightarrow Circular \rightarrow small$). Hier könnte beispielsweise ein Tischtennisball gehalten werden. Die wichtigsten Finger sind hier der Daumen und die Finger zwei bis drei. Man bekommt also einen VF1 mit dem Daumen und einen VF2 mit den Finger zwei bis drei. Die parallele Kraftlinie zur Handfläche lässt auf eine *Pad Opposition* schließen (s. Abschnitt 4.1).



Abbildung 30: Griff 6: Thumb-4 Finger Grasp. Quelle: [FREK]

Mit dem *Thumb-4 Finger Grasp* in Abb. 30, der zur Kategorie $Precision \rightarrow long \rightarrow Prismatic$ gehört, kann man einen Stift oder vielleicht ein dünnes Metallröhrchen halten. Hier werden wieder zwei VF benutzt, um das Objekt zu greifen. Der VF1 ist der Daumen und der VF2 sind die Finger zwei bis fünf. Aufgrund der gedachten Kraftlinie (parallel zur Handfläche) kann man auf eine *Pad Opposition*, dessen Definition wieder in Abschnitt 4.1 zu finden ist, schließen. Die letzten drei Griffe gehören ebenfalls zur selben Kategorie und verändern im VF2 nur die Anzahl der benutzten Finger.



Abbildung 31: Griff 7: Thumb-3 Finger Grasp. Quelle: [FREK]

So benutzt der *Thumb-3 Finger Grasp* (s. Abb. 31) für seinen VF2 nur die Finger zwei bis vier. Dieser besitzt auch den selben *Opposition Type* wie sein Vorgänger.



Abbildung 32: Griff 8: Thumb-2 Finger Grasp. Quelle: [FREK]

Der Griff acht (*Thumb-2 Finger Grasp*) in Abb. 32 braucht für seinen Griff im VF2 nur die Finger zwei bis drei. Ebenfalls kann hier eine *Pad Opposition* erkannt werden.

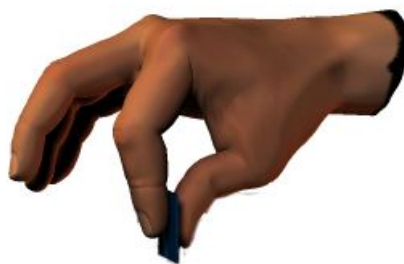


Abbildung 33: Griff 9: Thumb-Index Finger Grasp. Quelle: [FREK]

Und zuletzt der *Thumb-Index Finger Grasp* in Abb. 33, der für seinen Griff nur den Daumen (VF1) und den Zeigefinger (VF2) oder auch Index benötigt. Dieser Griff findet vor allem Verwendung dafür, um kleine Objekte von beispielsweise einer Tischoberfläche aufzuheben.

4.3 Anwendung der Greifvarianten

Die Greifvarianten aus Abschnitt 4.2 werden vor allem dort genutzt, wo eine Vielzahl an Griffen für verschiedene Greifaufgaben benötigt werden. Für komplexe Greifaufgaben werden in diesem Bereich allerdings vollaktuierte Roboterhände (Definition: Abschnitt 5.1) eingesetzt, um alle Varianten problemlos umsetzen zu können.

Des Weiteren sind diese Hände oft noch mit Sensoren (zum Beispiel KS oder taktile Sensoren) ausgestattet. Diese werden genutzt, um Bewertungskriterien und analytische Daten von den verschiedenen Griffen (Greifvarianten) zu bekommen. So beschreibt Cutkosky in seiner Veröffentlichung *On Grasp Choice, Grasp Models, and the Design of Hands for Manufacturing Tasks* [Cut89] Definitionen von analytischen Kriterien, die benutzt werden um einen Griff zu beschreiben.

Diesen Ausschnitt kann man in Abb. 34 betrachten. Die darin aufgeführten analytischen Qualitätskriterien werden nun der Vollständigkeit halber kurz vorgestellt.

Compliance (Nachgiebigkeit) beschreibt eine Funktion, die die Greifkonfiguration, die Gelenkservos und die konstruktiven Nachgiebigkeiten der Glieder, Gelenke und Fingerspitzen beinhaltet.

Connectivity (Zusammenhang) beschreibt wie viele unabhängige Parameter benötigt werden, um die Position und Orientierung des Objektes in Bezug auf die Handfläche komplett zu spezifizieren.

Force closure (Kraftschließung) beschreibt einen Griff, dessen Kontaktvektor (wrench) - bestehend aus Kräften und Momenten - einen Rang von sechs besitzt.

Form closure (Formschließung) beschreibt einen Griff, der externe Kräfte und Momente auf das Objekt ausüben kann, ohne dieses nach Beendigung der Fingerbewegung weiter zu bewegen.

Grasp isotropy (Greifisotropie) beschreibt eine Funktion der Zustandsnummern der Greif-Jacobi-Matrix. Das heißt die Greifkonfiguration ermöglicht den Fingergelenken eine präzise Ausübung von Kräften und Momenten auf das Objekt.

Internal forces (Interne Kräfte) besagen, dass die internen Greifkräfte so verändert werden können, ohne dass sie das Greifgleichgewicht zerstören.

Manipulability (Manipulierbarkeit) beschreibt, ob ein ausgeführter Griff im Nachhinein noch manipulierbar ist. Man spricht hier auch von In-Hand-Manipulation.

Resistance of slipping (Widerstandsfähigkeit gegen Rutschen) beschreibt wie groß die Kräfte und Momente, die auf das Objekt wirken, sein können bevor die Finger am Objekt abrutschen.

Stability (Stabilität) beschreibt die Fähigkeit eines Griffes, der nach Ausübung externer Kräfte oder Momente auf das Objekt, in seine Ursprungsorientierung zurückkehrt.

Compliance	What is the effective compliance (inverse of stiffness) of the grasped object with respect to the hand? The grasp compliance matrix is a function of grasp configuration, joint servoing, and structural compliances in the links, joints, and fingertips [6].
Connectivity	How many degrees of freedom are there between the grasped object and the hand? Formally, how many independent parameters are needed to completely specify the position and orientation of the object with respect to the palm [17]?
Force closure	Assuming that external forces maintain contact between the fingers and the object, is the object unable to move without slipping when the finger joints are locked? Formally, a grasp satisfies force closure if the union of the contact wrenches has rank 6 [17], [22].
Form closure	Can external forces and moments be applied from any direction without moving the object, when the fingers are locked? Formally, there is form closure, or complete kinematic restraint, if the intersection of all unisense contact twists is a null set. Thus seven frictionless point contacts are in general required to achieve form closure on a rigid body [13], [17].
Grasp isotropy	Does the grasp configuration permit the finger joints to <i>accurately</i> apply forces and moments to the object? For example, if one of the fingers is nearly in a singular configuration, it will be impossible to accurately control force and motion in a particular direction. Formally, the grasp isotropy is a function of the condition number of the grasp Jacobian matrix [12], [17]. Li and Sastry [14] define similar grasp quality measures that are functions of the singular values of the grasp Jacobian.
Internal forces	What kinds of internal grasp forces can the hand apply to the object? Formally, the internal grasp forces are the homogeneous solution to the equilibrium equations of the object. Thus internal grasp forces can be varied without disturbing the grasp equilibrium [12], [17].
Manipulability	While not consistently defined in the literature, a useful definition is: Can the fingers <i>impart</i> arbitrary motions to the object? Thus a manipulable grasp must have force closure and a connectivity of 6. In addition, the rank space of velocities due to the finger joints must span the space of velocities transmitted through the contacts [12].
Resistance to slipping	How large can the forces and moments on the object be before the fingers will start to slip? The resistance to slipping depends on the configuration of the grasp, on the types of contacts, and on the friction between the object and the fingertips [5], [10]–[12].
Stability	Will the grasp return to its initial configuration after being disturbed by an external force or moment? At low speeds, the grasp is stable if the overall stiffness matrix is positive definite [6], [21]. At higher speeds, <i>dynamic</i> stability must be considered [19].

Abbildung 34: Analytische Qualitätskriterien zur Beschreibung eines Griffes. Quelle: [FREK]

Diese Kriterien wurden hier, wie oben bereits erwähnt, nur der Vollständigkeit halber erläutert, da diese für die durchgeführten Vorstudien nicht hergenommen werden können. Dies liegt daran, dass die verwendeten Hände keine der oben aufgeführten Sensorik und Aktuation besitzen.

Mehr Informationen zu den analytischen Kriterien lassen sich der Veröffentlichung nach Cutkosky entnehmen. Um dennoch Bewertungskriterien an eine ausgeführte Greifvariante zu definieren werden später eigene Überlegungen in Abschnitt 8.1 vorgestellt.

Zusammenfassend wurden in diesem Kapitel grundlegende Informationen für eine Greifvariante vorgestellt und anhand der nach Cutkosky definierten Types of Grasps aufgezeigt und von Feix eingeschränkt. Ebenfalls wurden die analytische Qualitätskriterien, die einen Griff beschreiben sollen, kurz vorgestellt. Diese sind aber nicht für die Art von Roboterhänden, die im nächsten Schritt erläutert werden, vorgesehen.

5 Vorstellung unteraktuierter Roboterhände

Die Entwicklung von Endeffektoren ist seit Jahren ein sehr forschungsintensiver Bereich. Dabei reicht die Auswahl von relativ simplen Zweibackengreifern bis hin zu hochkomplexen humanoiden Roboterhänden. Im Folgenden werden zwei Kategorien, in denen man die Endeffektoren einteilen kann, erklärt. Anschließend werden die humanoiden Roboterhände des IIT, der TU Berlin und des DLR mit ihren Eigenschaften vorgestellt. Dabei wird auf die Wirkungsweise, die technischen Eigenschaften, die Handsteuerung und die möglich nutzbaren Greifvarianten eingegangen.

5.1 Definition: unteraktuierte Roboterhände

Endeffektoren - oder in diesem Fall humanoide Roboterhände - lassen sich in zwei Kategorien einteilen. Zum einen in die vollaktuierten und zum anderen in die unteraktuierten Roboterhände beziehungsweise Endeffektoren.

Zu den vollaktuierten Händen gehören diejenigen, die für jeden ihrer Gelenke jeweils einen Aktuator besitzen. Man ist damit in der Lage sämtliche Freiheitsgrade des Werkzeuges unabhängig voneinander zu benutzen. Es kann somit jedes Gelenk eines Fingers einzeln angesteuert werden.

Im Gegensatz zu den vollaktuierten Händen besitzen die unteraktuierten Hände teilweise nur einen Aktuator. Man besitzt weniger Aktuatoren als Freiheitsgrade und stößt somit auf das Problem, dass sich das Ansteuern oder das Regelungskonzept der Hand bei gleichbleibenden Aufgaben verkomplizieren. Ein wichtiger Vorteil von unteraktuierten Systemen ist jedoch, dass durch die Einsparung von Aktuatoren die Kosten und das Gewicht gering gehalten werden können. Im Bezug auf die Roboterhände muss allerdings nicht nur der finanzielle Aspekt, sondern auch der manipulative Aspekt in Betracht gezogen werden.

So muss noch erwähnt werden, dass trotz der Reduzierung der Aktuatoren, keine Reduzierung der Freiheitsgrade auftritt und die Hände somit in der Lage sind, sich an Objektgeometrien anzupassen [GAC⁺13]. Es wird dadurch aber auch das geplante Greifen eines Objektes erschwert, da man mit einer unteraktuierten Hand meistens alle Finger gleichzeitig ansteuert (Pisa-IIT Softhand in Abschnitt 5.2) und somit nur noch wenig aktiv nutzbare Freiheitsgrade besitzt. Darauf wird auch bei der Vorstellung der Hände eingegangen. Es gibt aber auch Hände, wie zum Beispiel die RBO Hand (s. Abschnitt 5.3), die ihren Zeigefinger (Index) und Daumen einzeln benutzen können. Oder auch die DLR WHISG Hand, die trotz ihrer Unteraktuation ihre Finger unabhängig voneinander bewegen kann.

5.2 Pisa-IIT Softhand

Die Pisa-IIT Softhand (s. Abb. 35) wurde in einer Partnerschaft zwischen dem *Centro E. Piaggio of the University of Pisa* und dem *Istituto Italiano di Tecnologia* (IIT) entwickelt. Mit diesem Projekt verfolgte man das Ziel, eine robuste und sichere Roboterhand mit geringen Herstellungskosten zu verwirklichen. Dafür wurden zwei Design Strategien miteinander kombiniert: Unteraktuation und nachgiebige Synergien.

Bei den Synergien handelt es sich um eine motorgesteuerte Strategie, die das Zusammenspiel der vielen Gelenke der Hand in schlüssige Bewegungsmuster umwandelt und somit aufeinander abstimmt [GAC⁺13]. Das Schließen der Hand läuft immer gleich ab, da die Synergien für diese robotische Hand und auch das Schließverhalten bereits vordefiniert und implementiert sind.

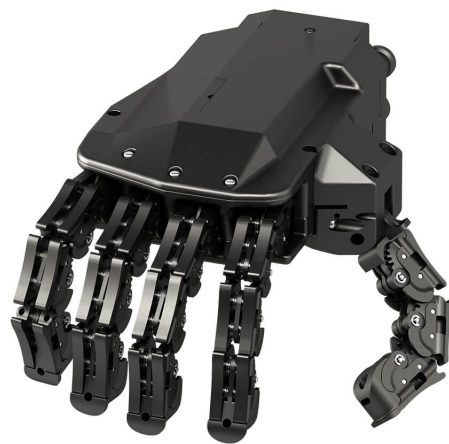


Abbildung 35: Pisa-IIT Softhand. Quelle: [rob16]

Wirkungsweise der Pisa-IIT Softhand

Die Pisa-IIT Softhand ist eine unteraktuierte Roboterhand. Wie in Abschnitt 5.1 erläutert, besitzt eine solche Hand weniger Aktuatoren als Freiheitsgrade. Die Pisa Hand hat nur einen Aktuator, der im Handrücken verbaut ist. Die Wölbung über dem Mittelfinger (Handrücken) lässt einen den Aktor errahnen (s. Abb. 35). In Abb. 36 (a) kann man noch den Prototypen der Pisa Hand sehen. Hier erkennt man die blauen Seile, die durch die Fingergelenke gefädelt sind und für die Funktionalität eine essentielle Rolle spielen. Unter Punkt (b) kann man die Kinematik der Hand dem vereinfachten Schema entnehmen. In dunkelgrau sind die Drehgelenke und in hellgrau die sogenannten Rollkontaktgelenke (*rolling contact joints*) abgebildet.

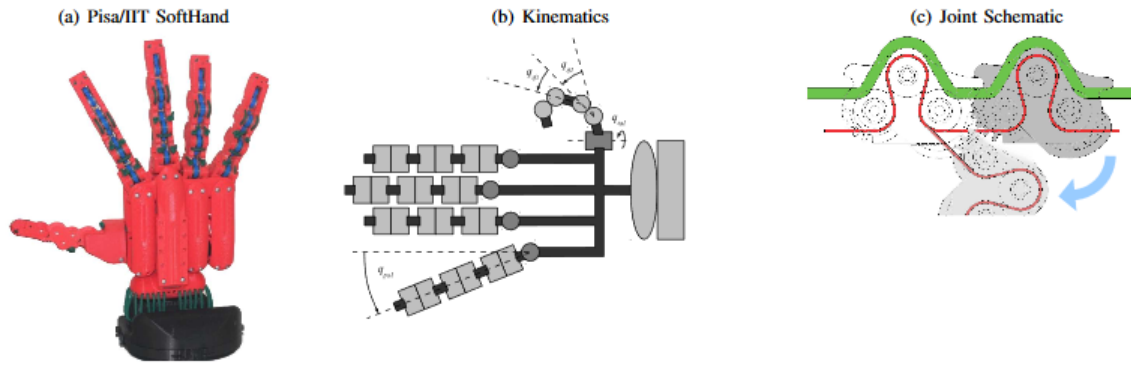


Abbildung 36: Schemata zur Erläuterung der Pisa-IIT-Handfunktion. Quelle: [GAC⁺13]

In Abb. 36 (c) sieht man einen Schnitt durch dieses Rollkontaktgelenk. Wie man erkennt, ist die Schnur - unter (c) rot dargestellt - jeweils pro Glied über drei Rollen geführt. Man könnte sich vorstellen, dass dies dafür gedacht ist, um Spiel in der Schnur zu vermeiden. So entsteht keine beziehungsweise nur eine geringe Verzögerung zwischen Ansteuerung des Aktuators und der Umsetzung der Bewegung der Hand. An den Rollkontakten sieht man die Zähne, die ineinander Greifen und somit eine Drehbewegung hervorrufen können.

Technische Eigenschaften

Die Pisa-IIT SoftHand besitzt fünf humanoide Finger mit insgesamt 19 Freiheitsgraden. Der Daumen hat hier drei Freiheitsgrade, während die anderen Finger vier davon besitzen. Aktiv nutzbar ist allerdings nur ein Freiheitsgrad, da die komplette Hand von nur einem Aktuator bewegt wird.

Die Hand misst eine Breite zwischen der Fingerspitze des Daumens zu der Fingerspitze des kleinen Fingers von ungefähr 23 cm. Eine Höhe gemessen vom Handgelenkadapter bis zur Fingerspitze des Mittelfingers von 23,5 cm und eine Handflächendicke von 4 cm.

Die Finger der SoftHand sind in der Lage sowohl krümmende als auch abspreizende und anziehende Bewegungen auszuführen. Um abspreizende und anziehende Bewegungen am Daumen realisieren zu können, wurde auf Höhe des Handwurzelknochens ein normales Drehgelenk verbaut. Dadurch kann zum Beispiel aus einem *Lateral Pinch Grasp* (s. Abb. 19) ein sogenannter *C Grasp* (s. Abb. 25) entstehen.

Ein weiterer Aspekt in Hinsicht auf die Pisa SoftHand, ist die Sicherheit. Die Hand sollte robust, aber auch nachgiebig genug für eine sichere Interaktion mit dem Menschen sein. Aus diesem Grund wurden die Rollkontaktgelenke mit elastischen Seilen verbaut (s. Abb. 36). Sie ermöglichen eine automatische Korrektur der Bewegung der Hand. Die Hand selbst widersteht durch das elastische Verhalten der Seile Deformationen, die durch externe Einflüsse auftreten können. Dabei werden die Kräfte, die auf die Rückseite des Fingers wirken, direkt aufgenommen. Kollisionen auf die Fingerinnenfläche werden über die differentielle Verkopplung an andere Finger weitergeben.

Die SoftHand wird, wie bereits erwähnt, über einen Aktuator betrieben. Dieser hat eine Leistung von 6 Watt und stammt aus dem Hause Maxon Motor (Modell: Maxon motor RE-max21). Der Motor hat eine Untersetzung von 84:1 und besitzt einen 12 Bit Magnetencoder. Die Auflösung beläuft sich auf 0.0875° (Modell: Austrian Microsystems AS 5045). Mit dem jetztigen verbauten Motor kann ein maximales Haltemoment von 2 Nm

und eine maximale Haltekraft von ungefähr 20 N senkrecht zur Handfläche erzielt werden [GAC⁺13].

Handsteuerung

Die Handsteuerung der Pisa Softhand erfolgt über eine sogenannte *Command Line Control*, die über das Betriebssystem Linux möglich ist. Um später aber auch in der Lage zu sein, je nach Situation entsprechend zu reagieren, wurde mit der Programmiersprache Python ein Skript geschrieben, welches definierte Befehle an die Linux Shell schicken kann. So ist man in der Lage bei verschiedenen Aufgabenstellungen mit Hilfe des Python Codes passende Signale zu senden. Die Shell verarbeitet die *commands* (Befehle) und steuert anschließend die per USB angeschlossene Pisa-IIT Hand an. Der Parameter, der übergeben wird, ist ein Integer Wert, der der Schließungsrate der humanoiden Hand gleichkommt. Man kann Werte von 0 bis 19000 schicken, wobei die 0 die vollkommen geöffnete Hand und die 19000 die vollkommen geschlossene Hand beschreibt.

Diese *Command Line Control* liefert aber noch mehr Funktionen mit sich. So kann man sich beispielsweise den Motorstrom und die Encoderwerte anzeigen lassen. Es ist allerdings nicht möglich die Handsteuerung und die Anzeige des Motorstroms parallel laufen zu lassen, da immer eine Funktion die USB Verbindung blockiert. Den Aktuatorstrom braucht man, um auf die wirkende Greifkraft, die am Objekt wirkt, schließen zu können. Somit musste man feststellen, dass die Einhaltung des gesamten Ocado Use Cases nicht möglich ist. Deswegen werden im Folgenden alle weiteren Roboterhände ebenfalls ohne Auslesen von Aktuatorendaten benutzt, um die Vergleichbarkeit der Experimente zu gewährleisten. Somit kann dem geforderten Punkt des Use Cases, nämlich die Sicherstellung, dass das Objekt beim Greifen und Halten nicht beschädigt wird, nicht nachgekommen werden.

Mögliche nutzbare Greifvarianten

Die Pisa-IIT Softhand ist mit ihrer Unteraktuation in der Wahl der Greifvarianten eingeschränkt. Durch die gleichzeitige Ansteuerung aller Finger über den Aktuator lassen sich nur sehr einfache Griffe realisieren. Mit Hilfe einiger Versuche konnten ein paar Greifvarianten nachgebildet werden. Hauptaugenmerk lag dabei auf der Orientierung des Objektes und auf der Position der Hand in Bezug auf die Objektposition. Das heißt, je nach Objektorientierung und Handposition entsteht eine gewisse Greifvariante. So konnte ein *Large Diameter Grasp*, ein *Thumb-Index Finger Grasp* und ein *Lateral Pinch Grasp* durchgeführt werden. Dies wird später auch noch einmal in den Vorstudien in Abschnitt 8 aufgezeigt.

5.3 RBO Hand 2

Die Robotics and Biology Laboratory (RBO) Hand 2 (s. Abb. 37) wurde von der Technischen Universität Berlin entwickelt und besteht fast vollständig aus Silikon. Die sogenannten PneuFlex Aktuatoren - von denen sieben verbaut sind (1 bis 7) - spielen dabei die Hauptrolle im Aufbau. Die Herstellung der Aktuatoren dauert allerdings nicht länger als einen Tag. Die Materialien, die hier benutzt werden, sind preisgünstig und umweltverträglich (non-toxic). Durch den Einsatz dieser passiven nachgiebigen Elemente im Handdesign, kann sich die RBO Hand an die Form des zu greifenden Objektes anpassen. Außerdem wird sie dadurch resistent gegenüber heftigen Einwirkungen von außen und lässt sich demnach nicht so schnell gebrauchsunfähig machen [DB15].

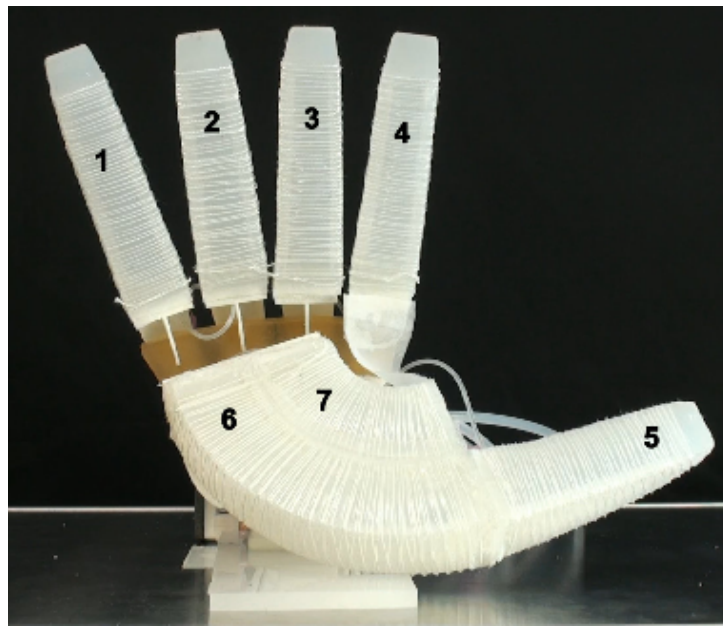


Abbildung 37: RBO Hand 2. Quelle: [DB15]

Wirkungsweise der PneuFlex Aktuatoren

Wenn der Aktuator befüllt wird, verlängert sich der obere Teil des Fingers, der aus lichtdurchlässigem Silikon besteht. Die Krümmung des Fingers erfolgt dadurch, dass im unteren Teil des Fingers nicht elastische Fasern eingebettet wurden. Die krümmende Bewegung wird so gezwungenermaßen vom unteren Teil des Fingers hervorgerufen, da durch die erwähnten Fasern eine Differenz in der Länge zwischen dem oberen und unteren Teil des Fingers entsteht [DB15].

In Abb. 38 (a) kann man einen befüllten Zeigefinger sehen. Wie man erkennt, besitzt die RBO Hand 2 keine Gelenke, wie es beispielsweise bei der menschlichen Hand der Fall ist. Dennoch kann mit Krümmung des Fingers ein ähnlicher Arbeitsraum abgedeckt werden. In derselben Abbildung (38) kann man unter der Einteilung (b) einen Schnitt durch den PneuFlex Aktuator sehen sowie unter (c) die wichtigen funktionalen Bestandteile des Aktuators betrachten. Ebenfalls muss noch erwähnt werden, dass die Schnur, mit der der Aktor umwickelt ist, dafür gedacht ist, um die Fingerform zu stabilisieren. Das Muster

indem die Schnur verlegt ist, wird als *double helix* bezeichnet. Mit *rubber top* ist die lichtdurchlässige Silikon Schicht des oberen Teiles des Fingers gemeint.

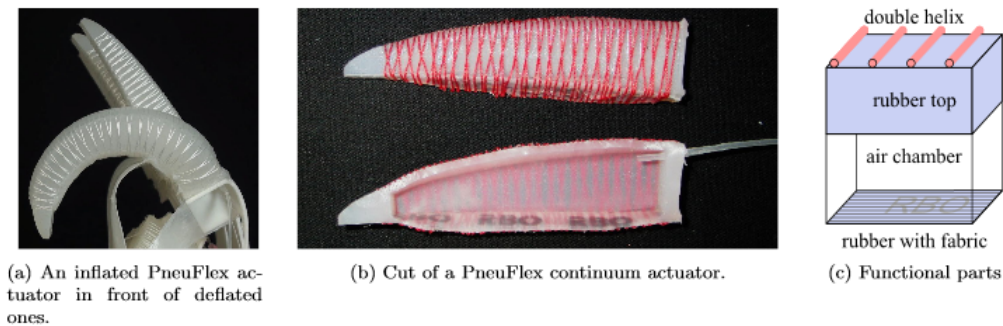


Abbildung 38: Wirkungsweise der PneuFlex Aktuatoren. Quelle: [DB15]

Durch den *double helix* wird das radiale Ausweiten des Fingers vermieden und dadurch die Längendehnung des oberen Fingerteiles unterstützt, wenn die *air chamber* befüllt wird. Die *rubber with fabric* Schicht ist die untere Schicht des Fingerteiles, in dessen Silikon nicht elastische Fasern eingelassen sind [DB15]. Diese realisieren die Funktionalität der Hand.

Technische Eigenschaften

Die RBO Hand 2 besteht aus sieben PneuFlex Aktuatoren, die mit Hilfe von Schläuchen mit einer pneumatischen Steuereinheit verbunden sind. Die Aktuatoren selbst dürfen nur mit einem Druck von maximal einem Bar belastet werden. Für die Vorsteuerung werden allerdings 2,5 Bar benötigt. Eine Reduzierung des Druckes erfolgt durch eine sogenannte Drosselfolie, die an den Ausgängen der Steuereinheit angebracht wurde. Zur Überwachung des Maximaldruckes sind Drucksensoren an den Anschlüssen parallel geschaltet.

Das Gewicht der Hand beträgt ungefähr 178 g und hat eine Tragkraft von bis zu 500 g. Bei der Hand kann bei Bedarf jeder Finger einzeln angesteuert werden, allerdings beschränkt man sich auf vier Anschlüsse an der pneumatischen Steuereinheit. Somit sind die Finger eins bis drei zu einem Anschluss verbunden, wobei der Zeigefinger (vier) und der Daumen (fünf) einzeln angesteuert werden können. Die restlichen Aktuatoren (sechs und sieben) der Handfläche werden ebenfalls wieder zusammen angesteuert (s. Fingernummerierung Abb. 37).

Handsteuerung

Gesteuert wird die RBO Hand 2 mit Hilfe der Programmiersprache Python. Durch die erstellten Klassen und Methoden der TU Berlin lässt sich die Hand sehr einfach steuern. Mit Hilfe des Python Codes werden Signale von -1 (entleeren) über 0 (schließen) bis 1 (öffnen) an die pneumatische Steuereinheit geschickt. Wenn man nun eine 1 an die Einheit schickt, dann füllt sich die *air chamber* solange bis die Zeit, die man mitschickt, abgelaufen ist und das neue Signal erfasst wird. Folgt als nächstes das Signal 0, dann wird der Zulauf geschlossen und der Finger bleibt in seiner aktuellen Position. Wird anschließend das Signal -1 an die Steuereinheit (s. Abb. 39) gesendet, dann entweicht die Luft aus dem angesteuerten PneuFlex Aktuator und er bewegt sich in seine Ausgangsposition zurück.

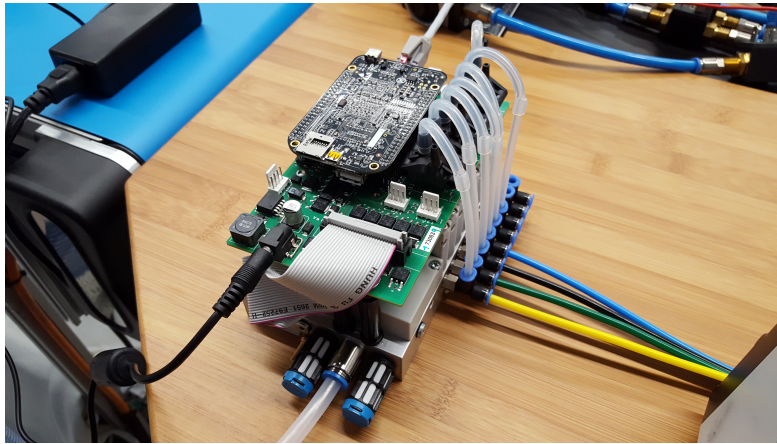


Abbildung 39: Steuereinheit *airserver*. Quelle: eigene Aufnahme

Auf der Steuereinheit ist ein kleines *Beagleboard* angebracht. Dieses verarbeitet die geschickten Signale und steuert die Anschlüsse der 5-3-Wege-Ventile an. Der verbaute Beagle liefert allerdings keinen Status der Hand zurück. Man weiß also nicht - wenn man beispielsweise keinen Sichtkontakt hätte - ob sich die RBO Hand gerade im Ausgangszustand oder in einer bestimmten angesteuerten Pose befindet.

Das könnte zur Folge haben, dass man die Hand erneut mit einer programmierten Bewegung beauftragt und diese aber schon mit einem Druck belastet ist. Hier kommen die Drucksensoren ins Spiel, um die Hand vor dem Ausfall zu bewahren. Es läuft nämlich im Hintergrund ein sogenannter *watchdog*, der permanent die Drucksensordaten abfragt und entscheidet, ob der Maximaldruck überschritten wurde oder ob alles im grünen Bereich läuft. Sollte der Maximaldruck überstiegen werden, sendet der Beagle einen sogenannten *soft emergency stop*. Wenn dieser Befehl auftritt, lässt sich die RBO Hand 2 nicht mehr ansteuern. Bevor dies wieder möglich ist, muss ein RESET durchgeführt werden. Dieser hat zur Folge, dass alle Controller, alle Client Einzeichnungen und der *soft emergency stop* zurückgesetzt werden. Nun müssen Controller und Clients neu initialisiert werden, um alles wieder normal benutzen zu können. Als nächstes soll gezeigt werden, welche Greifvarianten von Cutkosky, die in Feix Definition fallen, umgesetzt werden können.

Mögliche nutzbare Greifvarianten

Im Grunde genommen können mit der RBO Hand 2 sämtliche Griffe nachgebildet werden, da theoretisch jeder Finger einzeln ansteuerbar ist. Durch die Verbindung der Finger eins bis drei und sechs bis sieben entsteht jedoch auch nur ein geringer Verlust an Greifvarianten, falls das Objekt direkt in die RBO Hand 2 gegeben wird.

Die Aufgabenstellung hingegen beschreibt aber, dass ein Objekt aus einem IFCO Behälter gegriffen werden soll. Mit dieser Anforderung wird es schwierig mit der pneumatischen Hand Objekte vom Behälterboden zu greifen, da die Hand keinen opponierenden Daumen besitzt. Mit dem Daumen der RBO Hand 2 kann allerdings eine *Side Opposition* erzielt werden.

Das und die Überlegung die gegebene Umwelt als Hilfsmittel zu benutzen, könnte eine vielversprechende Lösung für das Problem des Daumens sein. So konnten ebenfalls durch kleine Versuche ein *Large Diameter Grasp*, ein *Small Diameter Grasp*, ein *Light Tool Grasp*, ein *Medium Wrap Grasp* und ein *Lateral Pinch Grasp* festgestellt werden. Auch

in den Vorstudien werden diese Greifvarianten wieder auftauchen. Im Folgenden wird die RBO Hand 2 auch nur RBO Hand genannt.

5.4 DLR WHISG Hand

In Abb. 40 kann man ein paar Aufnahmen des Prototyps der DLR WHISG Hand betrachten. *WHISG* bedeutet hier: *A wearable hand to investigate passive stiffness while grasping*. Die robotischen Hände des DLR sind schon immer mit Kraftmomentsensoren ausgestattet, um beispielsweise Impedanz Regelung zu ermöglichen. Das Ziel hiervon ist die Realisierung von gezielten Manipulationen, die das Setzen von maximalen Greifkräften an den Fingerspitzen möglich machen.

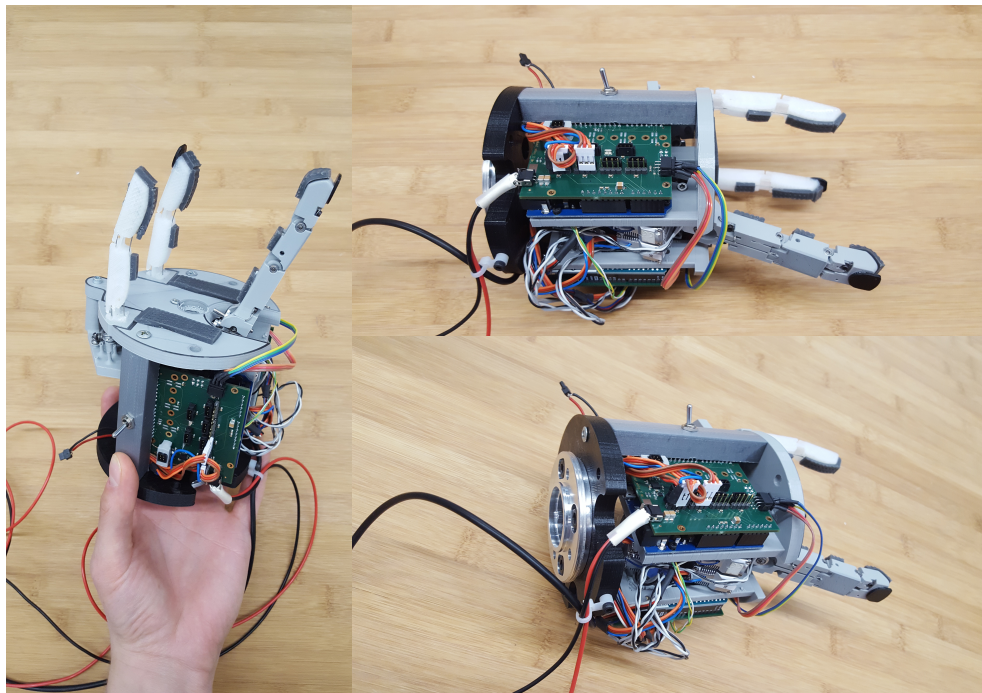


Abbildung 40: DLR WHISG Hand. Quelle: eigene Aufnahme

Allerdings sind diese robotischen Hände sehr empfindlich und sind nicht robust genug gegenüber Kollisionen. So entschied man sich Federn in die komplette Handkonstruktion einzubauen. Auch mit dem Einbau einer realen Feder in das System will man trotzdem an den erfolgreich erprobten Konzepten der Impedanz Regelung festhalten.

Es soll also trotzdem eine aktive Steifigkeit - auch wenn eine reale passive Steifigkeit verbaut ist - bestehen bleiben. Mit diesem Konzept will man der menschlichen Hand naheifern und somit ähnliche Greifeigenschaften herstellen. Die DLR WHISG Hand verzichtet auf die Verwendung eines herkömmlichen Fünf-Finger-Designs und besitzt wie in Abb. 40 zu sehen nur ein Drei-Finger-Design.

Wirkungsweise der DLR WHISG Hand

Der große Hauptfinger wird mit Hilfe des sogenannten N+1 UC1 Designs gesteuert. Das bedeutet, dass in dem Finger, der wie hier vier Freiheitsgrade und vier Motoren besitzt,

noch eine Unteraktuierung realisiert wurde. Somit sind drei Freiheitsgrade des Fingers aktiv nutzbar. Die Unteraktuation folgt daraus, dass das Mittelglied und das Endglied des Fingers über dieselben beiden Seile verkoppelt sind.

Im Endglied ist eine Schenkelfeder verbaut, welche dafür sorgt, dass sich das Glied erst bewegt, wenn eine bestimmte Seilkraft die Federkraft übersteigt. Das kann dadurch hervorgerufen werden, dass das Mittelglied in Kontakt mit einem Objekt kommt.

Die Motoren werden, um die Finger möglichst klein zu halten, in der Handfläche verbaut. Durch das Verbauen von *flexible antagonistic spring elements* (FAS) - zu sehen in Abb. 41 - können, wie bereits oben erwähnt, reale passive Federn in das System gebracht werden, um die Steifigkeit des Fingers anzupassen [GASB⁺11].

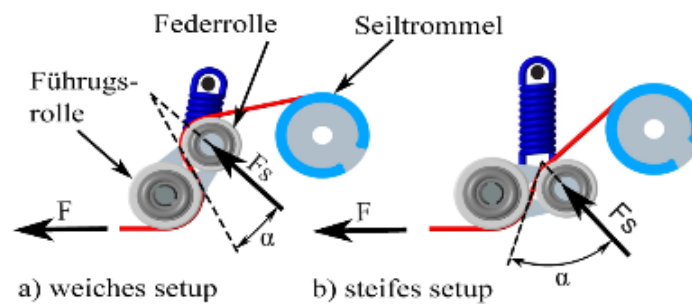


Abbildung 41: DLR Flexible Antagonistic Spring Element. Quelle: [GASB⁺11] (bearbeitet)

Dadurch, dass jedes Seil über ein FAS geleitet wird, kann auch die passive Steifigkeit des Fingers verändert werden. Um das zu erreichen, wird die Vorspannung auf den Seilen erhöht, was wiederum die FAS auslenkt. Da diese ein nicht lineares Verhalten besitzen, steigt die Steifigkeit an. Die Vorspannung wird über die zu einem Bauteil verbundene Führungs- und Federrolle über den Winkel α verändert. Das Verhalten wird auch als progressive Federung bezeichnet. Bei leichten Stößeinwirkungen wirkt dieser Mechanismus sensibel (weich), wobei er sich hingegen bei schweren Einwirkungen spürbar härter (steifer) verhält [GASB⁺11].

Die FAS können ebenfalls dazu benutzt werden, um die Seilkräfte zu messen und so die Greifkraft zu kontrollieren. Eine Regelung des Drehmomentes an den Gelenken kann somit auch realisiert werden.



Abbildung 42: Nylon Finger und Differential Mechanismus. Quelle: [FHRG16]

Die anderen beiden Finger (s. Abb. 42) haben zusammen vier Freiheitsgrade, wobei nur ein Freiheitsgrad aktiv nutzbar ist. Die Finger sind unteraktuiert und sind über zwei Seildifferentiale mit Beuger- und Streckermotor verbunden. Das heißt, es gibt für den Hauptfinger und die beiden kleinen Finger einen Extra-Motor, der nur für das Zurückstellen der Finger verantwortlich ist. In jeweils einem Seilstrang des Differentials befindet sich ein FAS. Diese werden zum Ändern der Steifigkeit und zum Kontrollieren der Seilkräfte benutzt. Das besondere an den beiden kleinen Fingern ist, dass sie komplett aus Nylon gedruckt sind und nicht aus dem häufig verwendeten Polylactid (PLA) bestehen.

Technische Eigenschaften

Die DLR WHISG Hand besitzt, wie oben aufgezeigt, drei Finger mit insgesamt acht Freiheitsgraden. So besitzt der Hauptfinger in Abb. 40 vier Freiheitsgrade, während die anderen zwei Finger jeweils zwei Freiheitsgrade besitzen. Aktiv nutzbar sind davon vier Freiheitsgrade.

Die ganze Hand - also von Flansch bis Fingerspitze - hat eine Höhe von 21 cm und im zylindrische Teil einen Durchmesser von 11 bis 12 cm. Der Hauptfinger erreicht über ein N+1 UC1 Design, welches unter der Teilüberschrift *Wirkungsweise der DLR WHISG Hand* bereits erklärt ist, eine Fingerspitzenkraft von 10 N.

Alle drei Finger sowie der Hauptrahmen sind mit Hilfe eines 3D-Druckers kostengünstig gedruckt (Rapid Prototyping). Auch durch Verwendung von Servos und einem Arduino konnten die Kosten niedrig gehalten werden. Die ganze Hand besitzt zwei Steifigkeitsgrade, die über den Benutzer aktiviert werden können.

Handsteuerung

Die Hand wird wie die anderen Hände zuvor auch mit der Programmiersprache Python angesteuert. Hierzu wurden verschiedene Methoden in einem Skript vom DLR zur Verfügung gestellt. Somit kann die Hand über eine Initialisierung bis hin zum kompletten Schließen ihrer Finger genutzt werden. Dem Befehl, der beim Schließen der Hand verwendet wird, wird eine Steifigkeit und eine Fingerkraft übergeben. Das Schicken desselben Befehls ermöglicht unter Veränderung des ersten Steifigkeitswertes eine Veränderung der Steifigkeit der Finger.

Mögliche nutzbare Greifvarianten

Bei der DLR WHISG Hand sind die drei Finger so angeordnet, dass diese immer einen opponierenden Finger besitzen. Somit kann eine relativ hohe Anzahl an Greifvarianten umgesetzt werden. Natürlich können durch das Fehlen der zwei zusätzlichen Finger - nämlich Mittelfinger und kleiner Finger - keine Fünf-Finger-Griffe ausgeführt werden. Zu den möglichen Greifvarianten der DLR Hand gehören der *Medium Wrap*, der *Large Diameter*, der *Small Diameter*, der *Thumb-2 Finger* und der *Thumb-Index Finger*.

Hier konnten nun die drei verwendeten Roboterhände ausführlich vorgestellt werden. Technische Eigenschaften sowie die Steuerung der einzelnen Endeffektoren wurden dabei unter anderem aufgezeigt. Aus diesem Wissen wird nun im Folgenden versucht, Ansätze für Greifstrategien aus der Literatur und selbstständig aufzustellen.

6 Literaturrecherche zu Greifstrategien

Zum Thema Greifstrategien ist in der Literatur nur sehr wenig bis gar nichts zu finden. Aus diesem Grund wurden eigene Überlegungen angestellt, um die Aufgabenstellung - also das Greifen von nachgiebigen Objekten aus einem IFCO Behälter - zu meistern. Dabei muss vor allem auf das Design, wie beispielsweise die Anzahl der Finger oder die aktiv nutzbaren Freiheitsgrade der verwendeten Roboterhand, geachtet werden. Für unterschiedliche Hände ergeben sich unterschiedliche Strategien. Um solche Strategien aufstellen zu können, wird im Folgenden nun erst einmal definiert, was als Greifstrategie und was als Greifvariante bezeichnet wird.

6.1 Unterscheidung Greifstrategie versus Greifvariante

Eine Greifstrategie und eine Greifvariante unterscheiden sich im Wesentlichen in den Bewegungsabläufen des Roboterarms sowie der Roboterhand.

So ist bei einer Greifvariante nur der Griff selbst von Bedeutung. Damit ist gemeint, dass eine Greifvariante ein ruhender und bereits fertig ausgeführter Griff ist und keine manipulativen Bewegungen mehr ausgeführt werden. Es wird dabei versucht die Greifvarianten nach Cutkosky umzusetzen.

Wenn man sich nun auf die Greifstrategie konzentriert, so erkennt man im Grunde genommen das genaue Gegenteil zur Greifvariante. Bei einer Strategie ist die manipulative Bewegung verschiedener Komponenten der Schlüssel zum Erfolg. Es kann versucht werden mit dem Roboterarm ein Objekt so zu manipulieren, dass seine Aufnahme begünstigt wird. Dasselbe kann mit der Roboterhand durchgeführt werden.

Am wahrscheinlichsten ist jedoch eine Kombination aus beiden Bewegungen. Das Objekt kann somit in eine passende Position und Orientierung gebracht werden, um später hoffentlich ein positives Greifergebnis zu vermerken. Allerdings muss noch erwähnt werden, dass eine Kombination aus den beiden Bewegungen nicht parallel ablaufen kann. Das heißt sie laufen gestaffelt hintereinander ab. Beispielsweise wird erst eine Bewegung des Roboterarms ausgeführt und danach die Bewegung der Roboterhand oder umgekehrt. Zusammenfassend ist Tabelle 2 angefügt.

Greifstrategie	vs.	Greifvariante
manipulative Bewegungen erwünscht		keine manipulative Bewegung Greifvarianten nach Cutkosky (s. Abb. 17 ff.)
Bewegung mit Roboterarm Bewegung mit Roboterhand Kombination aus beiden Bewegungen (zeitlich gestaffelt)		ruhender, ausgeführter Griff

Tabelle 2: Unterscheidung Greifstrategie vs. Greifvariante. Quelle: eigene Unterscheidung

Da nun der Unterschied zwischen Greifstrategie und Greifvariante geklärt ist, werden nun Überlegungen für mögliche Greifstrategien angestellt. Dabei wird bereits auf die unterschiedlichen Kinematiken der Roboterhände und deren Design geachtet.

6.2 Greifstrategien

Das Grundprinzip, das für die Greifstrategien erprobt werden soll, ist für alle Hände gleich. So werden die drei allgemeinen Prinzipien **Top**, **Lateral** und **Environment Constraint Grasp** vorgestellt.

Als *Top Grasp* bezeichnet man im Folgenden, eine Strategie, bei der das Objekt von oben (top) gegriffen werden soll. Hier ist also die Handfläche des Endeffektors parallel zum Boden des IFCO Behälters.

Mit dem *Lateral Grasp* ist ein seitlicher (lateral) Greifversuch des Endeffektors gemeint. Dessen Handfläche soll somit parallel zu einer Wand des Behälters gerichtet sein. Diese Strategie wird aber vernachlässigt, da für die Vorstudie nur ein Objekttyp verwendet wurde und eine solche laterale Strategie nicht zum Erfolg geführt hätte.

Als letztes folgt noch der *Environment Constraint Grasp*. Hier wird gezielt die Umgebung als Hilfsmittel genutzt, um so das zu greifende Objekt zu manipulieren.

Zu den allgemeinen Prinzipien kommen anschließend noch handspezifische (HsS) und roboterspezifische (RsS) Strategien hinzu, die das Objekt manipulieren sollen und somit einen erfolgreichen Griff realisieren können. Aus der Kombination der Grundprinzipien und der spezifischen Strategien entsteht eine Greifstrategie (s. Abb. 43). In Abschnitt 8 wird dazu noch mehr erläutert und in Bezug auf die Greifvarianten eine entscheidende Annahme getroffen.

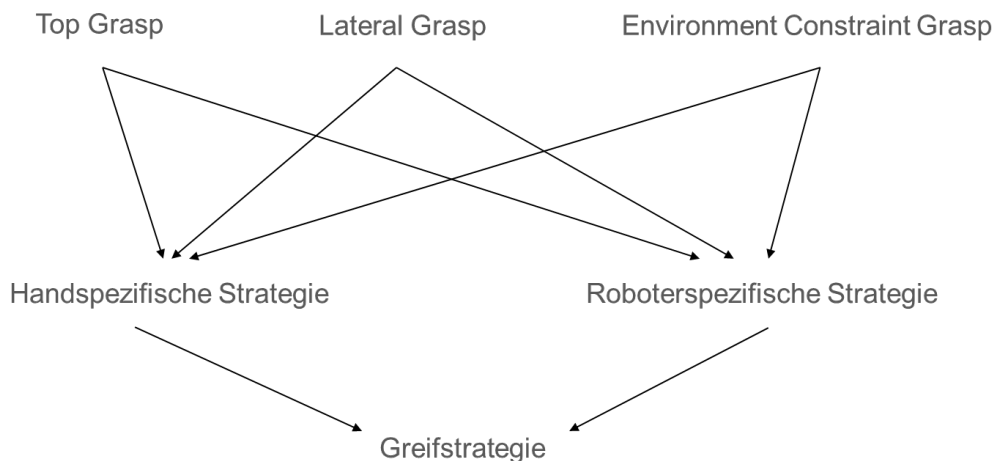


Abbildung 43: Aufbau einer Greifstrategie. Quelle: Eigenes Schema

Pisa-IIT Softhand

Mit dem Design der Pisa-IIT Softhand will man sich vor allem in dem Bereich der *Top Grasp* Strategie bewegen. Der opponierende Daumen bietet sich dazu förmlich an. Hier muss darauf geachtet werden, dass der Abstand von der Handfläche der Hand zum Objekt richtig gewählt wird, da man sonst mit den Fingern zu heftig in den Tisch fährt. Ansonsten könnte die Pisa Hand einfach mit einer gewünschten Schließungsrate geschlossen werden, um einen Greifversuch auszuführen.

Auch eine Nutzung der *Environment Constraint Grasp* Strategie wäre möglich. Man könnte mit einer Roboterbewegung den Endeffektor und somit das Objekt sanft gegen die

Wand drücken. Die kombinierte Bewegung aller Finger gleichzeitig könnte allerdings zu Problemen - einem Fehlgriff - führen. Durch schrittweises Öffnen und Schließen der Hand - beispielsweise bei einem EC Grasp - könnte man das Objekt mit der IFCO Wand so manipulieren, dass man mit der Roboterhand unter das Objekt greifen kann.

RBO Hand

Die RBO Hand hingegen ist eher für die *Environment Constraint Grasp* Strategie gemacht, da der Daumen der Hand keine opponierende Stellung aufweist. Man könnte versuchen das Objekt zwischen Zeigefinger und Daumen einzuklemmen, wie bei einem *Lateral Pinch Grasp*. Die Frage ist aber, ob dieser Griff dann genügend Kraft auf das Objekt ausüben kann.

Allerdings lässt die Form der Finger (s. PneuFlex Aktuatoren in Abb. 38) eine perfekte Anpassung an das Objekt zu und bietet sich für die Nutzung der Umwelt (EC Grasp) an. So könnte man das Objekt mit Hilfe des Roboters gegen die Wand schieben und anschließend versuchen, aufgrund der Form der Finger, komplett unter das Objekt zu kommen. Ein erfolgreicher Griff wäre mit hoher Wahrscheinlichkeit die Folge. Man muss aber vielleicht darauf achten, dass sich die RBO Hand ähnlich wie bei der Pisa Hand umgesetzt in verschiedenen Stufen schließt.

DLR WHISG Hand

Die DLR WHISG Hand kann mit ihrem Design sowohl die *Top Grasp* als auch die *Environment Constraint Grasp* Strategien gut abdecken. Durch die ebenfalls nachgiebigen Finger und der vereinfachten Position des Flansches - gemeint ist damit, dass der Endeffektor nicht komplett in den IFCO Behälter gebracht werden muss - kann diese Funktionalität erzielt werden. So muss bei der *Top Grasp* Strategie auf die richtige Orientierung der Hand zum Objekt, die nur drei Finger besitzt, geachtet werden. Anschließend könnte man die Hand mit einer bestimmten Steifigkeit und Greifkraft schließen und somit einen Greifversuch starten.

Bei der *Environment Constraint Grasp* Strategie wird man nicht wie bei den anderen beiden Roboterhänden versuchen das Objekt gegen die Wand zu schieben, sondern man könnte probieren mit dem Hauptfinger entlang der Wand nach unten, hinter das Objekt zu kommen. Dafür wird eine relativ genaue Bewegung des Roboterarmes benötigt.

In Bezug auf eine komplette Automatisierung des Verpackungsprozesses, könnte auch noch über vollständig autonome Strategien nachgedacht werden.

So hat man sich beispielsweise Gedanken zu einer *Region Depending Strategie* gemacht. Hier könnten über das Bildverarbeitungssystem die Objektposition, -orientierung und -geometrie an eine entsprechende Programmlogik weitergegeben werden. Diese Programmlogik könnte als sogenannter Greifexperte die für diese Situation benötigte allgemeine Strategie (Top, Lateral oder EC Grasp) auswählen und ebenfalls eine geeignete TCP Orientierung für den Greifversuch festlegen. Die Orientierung muss je nach Wandabstand hinterlegt und anschließend ausgewählt werden.

Falls Ungenauigkeiten in der Bilderverarbeitung auftreten, wäre eine *Strategy for Coping with Uncertainties* hilfreich. Hier ist das Hauptziel die häufig auftretenden Ungenauigkeiten der Bildverarbeitung auszugleichen. So könnte beispielsweise für die Hand eine Orientierung zum Anfahren an das Objekt gewählt werden, die Ungenauigkeiten abde-

cken kann. Man spricht hier von ungefähr plus minus zwei Zentimetern.

Eine *Strategy for Online Selection of Grasps* könnte diese beiden zuvor erläuterten Strategien beinhalten. So müssten nicht nur Greifexperten, sondern auch noch Objektgeometrieexperten (Datenbank) implementiert werden. Es könnte dadurch aus der Position, der Orientierung und der Geometrie des Objektes immer eine geeignete Strategie ausgewählt werden. Man könnte somit eine flexible und hochkomplexe Lösung für die Greifaufgabe entwickeln.

In diesem Kapitel konnte eine grundlegende Unterscheidung zwischen Greifstrategien und Greifvarianten aufgezeigt werden. Der Aufbau einer Greifstrategie konnte ebenfalls anhand eines Schemas erläutert werden. Mögliche Strategien wurden im Nachhinein vorgestellt. Als nächstes wird auf die Implementierung dieser Greifstrategien eingegangen.

7 Implementierung der Greifstrategien

Es werden die in Abschnitt 6 vorgestellten Strategien in Programmcode umgewandelt. Es muss allerdings schon erwähnt werden, dass die Bildverarbeitung nicht zufriedenstellende Ergebnisse lieferte und deshalb auf diese verzichtet werden muss (s. Abschnitt 7.3).

Die Strategien, die für eine komplette Automatisierung entwickelt wurden, konnten nicht umgesetzt werden. Die allgemeinen Strategien können allerdings realisiert werden. Dafür wird kurz der Aufbau der implementierten Python Skripte vorgestellt. Dabei soll auch aufgezeigt werden, welche Teile selbst programmiert und welche Teile zur Verfügung gestellt wurden. Das Ganze wird in die Unterpunkte *Programmierung des Leichtbauroboters* und *Programmierung der Roboterhände* unterteilt, da eine vollständige Integration der Skripte ineinander noch nicht möglich war. Ebenfalls wird die *Programmierung der Hilfsmittel* aufgezeigt.

Bevor der Code am realen Roboter getestet werden kann, wird über eine Simulationsumgebung das Verhalten des Roboters überprüft und bei Auffälligkeiten entsprechend reagiert, das heißt Positionen angepasst beziehungsweise hinzugefügt (Vermeidung von Singularitäten). Mit einer Validierung der programmierten Bewegungen in einer Simulation, kann man später relativ sicher sagen, dass diese auch am realen Roboter erfolgreich ausgeführt werden. Auf die Simulation wird allerdings nicht weiter eingegangen, da eine weitere Erläuterung der Simulationstools sowie den vom DLR entwickelten *Links and Nodes Manager* den Rahmen der Arbeit sprengen würden. Es lässt sich jedoch sagen, dass alle implementierten Skripte zuvor die Simulation durchlaufen haben und gegebenenfalls angepasst wurden.

7.1 Programmierung des Leichtbauroboters

Im Folgenden wird nur auf die roboterspezifische Programmierung eingegangen, um die gewünschten Bewegungen des Roboterarmes umzusetzen. Verständlicherweise werden hier die Namen der benutzten Methoden der Klasse *Robot* sowie deren Übergabeparameter nicht aufgeführt, da diese vom DLR implementiert wurden.

Der Aufbau der Skripte für die Roboterprogrammierung ist im Großen und Ganzen für alle Roboterhände und Strategien gleich. Natürlich sind bei unterschiedlichen Bauweisen der Hände oder unterschiedlichen Strategien andere Positionen nötig, um ein Objekt erfolgreich zu greifen.

Zunächst werden die benötigten Python Module importiert. Hauptbestandteil bietet hier die Klasse *Robot*. Anschließend wird eine Möglichkeit gesetzt das Skript in der Simulation oder am realen Roboter laufen zu lassen. Für beide Möglichkeiten definiert man einen *Host* und einen *Port*. Zu diesen globalen Variablen kommen noch die gewünschten kartesischen Koordinaten, die vorher aufgenommen wurden. Diese sind in einem *Array* abgespeichert und die *Home Position* einzeln deklariert.

Das Anpassen der verschiedenen Position war die Hauptaufgabe der roboterspezifischen Programmierung. Um die kartesischen Koordinaten zu erhalten, wurden alle Strategien zuvor selbst mit *Joint Level Control* programmiert, da die *Cartesian Impedance Control* in der Simulation zu diesem Zeitpunkt fehlerhaft war. Die Winkel wurden so angepasst, dass sich perfekte Greifsituationen ergaben. Anschließend konnten unter der Hilfe des *Loggers* zu einem späteren Zeitpunkt die benötigten kartesischen Koordinaten ausgelesen und abgespeichert werden.

Nun beginnt die *Main* Funktion, in der als erstes ein Objekt der Klasse Robot erstellt wird. Dazu wird dem Roboter ein Name gegeben und die Anzahl seiner Gelenke festgelegt. Nun werden die verwendeten Endeffektordaten - in diesem Fall die unterschiedlichen Roboterhände - mit Informationen zu Gewicht und Größe des benutzten Tools geladen. Ein *Logger* sowie eine Kommunikationsinitialisierung wird als nächstes aufgesetzt. Dabei dient ersterer zum Mitloggen von Ereignissen, die der Roboter ausführt beziehungsweise ausgeführt hat. Nun werden die Bremsen des Roboters gelöst und die *Home Position* sowie die im *Array* abgelegten kartesischen Koordinaten können angefahren werden. Nach jeder angefahrenen Position wurde eine Abfrage implementiert, ob der Roboter richtig gefahren ist. Mit Drücken der ENTER Taste wird dann die nächste Position angesteuert, bis die letzte Position (Home Position) erreicht wurde. Danach werden die Bremsen wieder gesetzt und man kann im Nachhinein die Loggerinfo betrachten. Dies funktioniert allerdings auch während des Betriebes.

7.2 Programmierung der Roboterhände

Als nächstes wird auf den grundlegenden Aufbau der Skripte der handspezifischen Programmierung geschaut. Es wird ebenfalls auf die visuelle Darstellung der Methoden und Module verzichtet, um den Umfang nicht zu sprengen.

Genau wie bei der Programmierung des Leichtbauroboters, sind die Skripte, die zum Steuern der Roboterhände benutzt werden, in ihrer Struktur gleich aufgebaut.

Als erstes werden wieder die benötigten Python Module mit Hilfe von sogenannten *Import Statements* eingebunden. Anschließend wird eine Kommunikationsverbindung mit dem Rechner hergestellt. Bei der Pisa-IIT Softhand und der DLR WHISG Hand erfolgt die Verbindung über ein USB Kabel. Bei der RBO Hand wird hingegen ein Ethernet Kabel verwendet (s. Abschnitt 5). Es werden dann also die entsprechenden USB Ports oder die IP Adresse initialisiert.

Es wurden Methoden geschrieben, die es dem Nutzer ermöglichen, die Hand zu manipulieren. Am einfachsten passiert dies bei der Pisa Hand, deren Methoden selbstständig implementiert wurden. Das Python Skript kommuniziert mit der Linux Shell. Diese Kommunikation wurde zuvor auch implementiert. Es muss nur eine gewünschte Schließungsrate zwischen 0 und 19000 übergeben werden, um eine Bewegung der Hand auszuführen. Ebenfalls kann auf eine Methode zurückgegriffen werden, die in einer Endlosschleife ständig nach den gewünschten Raten fragt. Diese kann über die Eingabe von „q“ beendet werden. Etwas schwieriger war die Implementierung der RBO Hand. Hier wurden eigenständig nach erfolgreicher Initialisierung verschiedene Methoden zum Befüllen der PneuFlex Aktuatoren definiert. Dabei wurden die Methoden streng nach den angeschlossenen Fingern aufgeteilt. Während bei der Pisa-IIT Softhand nur einzelne Schließungsraten übergeben werden können, konnten bei der RBO Hand komplexere Strategien entwickelt werden.

Man kann beispielsweise die Hand komplett schließen oder mit dem Zeigefinger vorgreifen. Weiter noch ist man in der Lage ebenso mit den vier Fingern der Hand ein Objekt vorzugreifen. Dieses Vorgreifen kann auch Schrittweise - das heißt die Finger schließen sich in kleinen Schritten - ausgeführt werden. Für einen kompletten Griff ist der Daumen so implementiert, dass er sich zuletzt nach den Bewegungen der anderen Finger schließt und das Objekt stabilisiert. Abschließend wurden die Bewegungsmuster in einer Hauptfunktion genutzt, um verschiedene Strategien zu realisieren. Auch bei der RBO Hand wurde eine Methode mit Endlosschleife implementiert. In den Methoden werden die Signale mit

den Ansteuerzeiten der pneumatischen Ventile definiert und für jede Strategie sowie für jede Fingerkombination angepasst.

Die Programmierung der DLR WHISG Hand erfolgte durch das DLR. Es wurden also nur die Methoden, die zur Verfügung gestellt wurden, genutzt. Dadurch konnte man die DLR Hand initialisieren und steuern. Durch Übergabe der Parameter Steifigkeit und Sollgreifkraft konnte anschließend ein Greifversuch probiert werden.

7.3 Programmierung der Hilfsmittel

Mit den Hilfsmitteln sind die Pixy Cam und die Ablageplatte gemeint. Erstere wurde zwar im Nachhinein wegen mangelnder Genauigkeit verworfen, aber dennoch wurde die Datenauslese programmiert. Das Auslesen des Kraftsensors wurde ebenfalls programmseitig gelöst.

So wird der mit der Pixy Cam verbundene Arduino über eine USB Verbindung mit dem Rechner verbunden. Der Arduino liefert eine x- und eine y-Koordinate, die über Python ausgelesen werden können. Diese Koordinaten werden anschließend auf die Roboterkoordinaten umgerechnet. Wenn die Position in dem IFCO Behälter bekannt ist, kann über die definierte Position des Behälters auf die für den Roboter nutzbare kartesische Position geschlossen werden. Durch vorher aufgenommene Positionen, die den IFCO Behälter komplett abdeckten, konnte eine Normalisierung in verschiedene Bereiche durchgeführt werden. Anschließend werden die ausgegebenen Werte des Arduino in Python mit den definierten Bereichen verglichen und eingeteilt. Der entsprechende Normalisierungsfaktor wird dann benutzt, um die IFCO Behälter Koordinaten in Roboterkoordinaten umzurechnen. Es ergaben sich durch die Normalisierung erhöhte Ungenauigkeiten, obwohl manche Anfahrversuche recht zufriedenstellend waren. Der angefahrene Punkt lag aber durchaus einmal bis zu sieben Zentimeter neben dem eigentlichen Objektpunkt. Deshalb musste man auf die Bildverarbeitung verzichten und konzentrierte sich auf die in Abschnitt 8 durchgeführte Vorstudie mit fest positioniertem bekannten Objekt.

Bei der Ablageplatte wurde ähnlich vorgegangen. Der Kraftsensor wurde über den Arduino ausgelesen. Die ausgegebenen Integer Werte wurden durch ein definiertes Gewicht erfasst und ein Umrechnungsfaktor ermittelt. Damit konnte in Python die resultierende Kraft sowie das wirkende Gewicht errechnet werden. Mit dem Setzen eines Grenzwertes konnte dann ein Watchdog implementiert werden (mehr s. Abschnitt 8.2).

In diesem Kapitel konnten die Struktur und die Funktionsweise des implementierten Programmcodes für die drei oben genannten Teilbereiche vorgestellt werden. Da die umgesetzten Strategien die Simulation erfolgreich durchlaufen haben, können diese nun im Folgenden am realen Roboter getestet werden. Dabei sind alle Strategien für fest positionierte bekannte Objekte ausgelegt. Zunächst werden aber sogenannte *Performance Measures* für eine Greifvariante aufgestellt und der Versuchsaufbau anhand von Bildern erläutert.

8 Vorstudie mit fest positioniertem bekannten Objekt

Der Name *Vorstudie* wurde gewählt, da diese Experimente mit fest positioniertem bekannten Objekt eigentlich „vor“ einem *Hauptexperiment* mit Bildverarbeitung durchgeführt werden sollten. Das Hauptexperiment konnte allerdings aufgrund von Schwierigkeiten bei der Integration der Bildverarbeitung nicht ausgeführt werden. Die Name *Vorstudie* blieb allerdings bestehen.

Zum Aufstellen der Bewertungskriterien an einen Griff, müssen neue Anforderungen definiert werden. Anhand der Vorstudie müssen diese belegt werden, da die analytischen Kriterien in Abschnitt 4.3 nur für sensorbestückte vollaktuierte Roboterhände ausgelegt sind.

Ebenfalls muss erwähnt werden, dass es generell bei den verwendeten Roboterhänden nicht möglich ist, eine Greifvariante geplant auszuführen. Das heißt, die Greifvariante entsteht aus der Greifsituation heraus und hängt vom angefahrenen Punkt des TCPs ab. Auch die Platzierung, die Orientierung und die Geometrie des Objektes in dem IFCO Behälter spielen eine entscheidende Rolle.

Aufgrund dessen sind in der Vorstudie verschiedene Punkte in dem IFCO Behälter für den Roboter definiert. Das Objekt wird immer an einem bestimmten Punkt platziert. Der Roboter fährt diese Position an und anschließend versucht eine der Roboterhände einen Griff auszuführen. Für alle Versuche wurde eine Bananenattrappe der Forschungsgruppe YCB verwendet. Solche Attrappen werden von vielen wissenschaftlichen Einrichtungen verwendet, um eine Vergleichbarkeit von Forschungsergebnissen zu ermöglichen.

8.1 Bewertungskriterien für eine Greifvariante

Als Bewertungskriterien werden sogenannte *performance measures* für unteraktuierte Roboterhände (ohne Sensorik) definiert und Ergebnisse anhand der Vorstudie aufgenommen. Diese Kriterien basieren komplett auf experimenteller Ausführung und bewerten einen Griff dabei nicht nach den aufgenommenen Sensor- beziehungsweise Aktuatordaten, sondern nach visueller Inspektion. Hierfür wurde ein Schema erstellt, dass die Vorgehensweise zur Bewertung des entstandenen Griffes erklären soll. In Abb. 44 sieht man die Vorgehensweise, die dazu dienen soll, eine qualitative Aussage über den entstandenen Griff zu machen.

Zunächst wird dazu ein Greifversuch angestellt. Der Roboter fährt in die programmierte Position und die Hand wird geschlossen. Hier wird anschließend verzeichnet, ob der Versuch erfolgreich war oder ob dieser fehlgeschlagen ist.

Später soll bei kompletter Automatisierung ermittelt werden, wie erfolgreich eine bestimmte angefahrne Greifsituation war. Diese Erfahrungen können für eine Entscheidung des Greifexperten genutzt werden. Man spricht hier auch von Maschinlernen.

Sollte ein Griff nun erfolgreich gelingen, kommt es zu einer visuellen Inspektion des Griffes durch den Vorstudienleiter. Hier wird vor allem danach geschaut, wie viele Kontaktpunkte zwischen Hand und Objekt entstanden sind. Mögliche Kontaktpartner zum Objekt sind die Finger mit ihren Glieder und die Handfläche. Die aktuelle Anzahl der Kontaktpunkte wird anschließend aufgenommen.

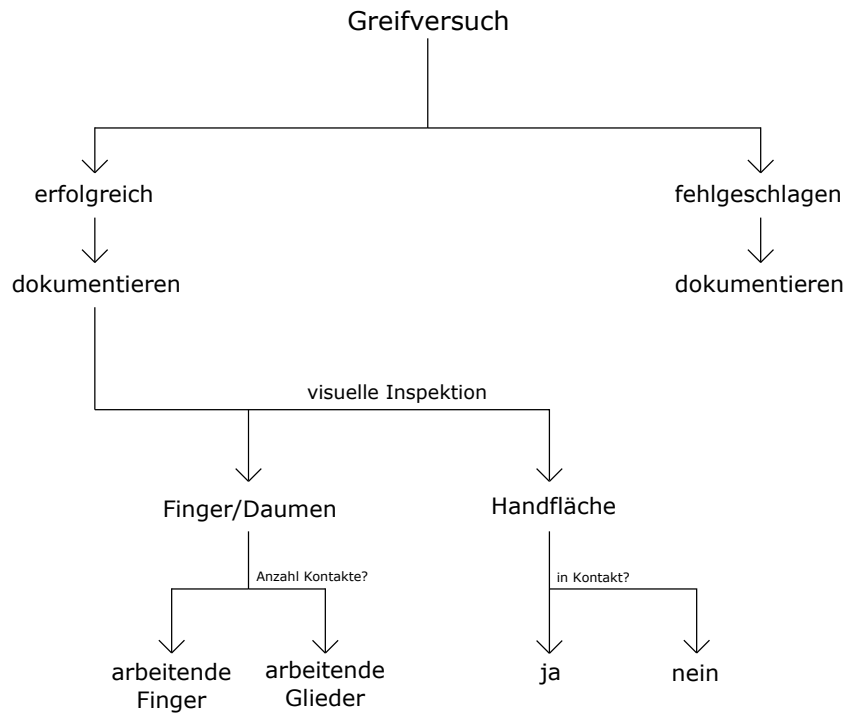


Abbildung 44: Vorgehensweise zur Bestimmung der Griffsicherheit. Quelle: eigenes Schema

Aus dem Quotienten der Anzahl der aktuellen Kontaktpunkte (P_{akt}) und den maximal möglichen Kontaktpunkten der Hände (P_{max}) wird ein Bewertungsfaktor K_B , der die Griffsicherheit beschreiben soll, errechnet (s. Gleichung (2)):

$$K_B = \frac{P_{akt}}{P_{max}} = 0 \dots 1 \quad (2)$$

Wobei darauf geachtet werden muss, dass für P_{akt} und P_{max} folgende Einschränkungen, für die einzelnen robotischen Hände, zu machen sind:

$$\text{Pisa IIT Softhand} \quad P_{akt} = \begin{cases} 0 \text{ bis } 1 & \text{kein erfolgreicher Griff} \\ 2 \text{ bis } 16 & \text{maximal mögliche Kontaktpunkte} \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{DLR WHISG Hand} \quad P_{akt} = \begin{cases} 0 \text{ bis } 1 & \text{kein erfolgreicher Griff} \\ 2 \text{ bis } 8 & \text{maximal mögliche Kontaktpunkte} \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{RBO Hand 2} \quad P_{akt} = \begin{cases} 0 \text{ bis } 1 & \text{kein erfolgreicher Griff} \\ 2 \text{ bis } 7 & \text{maximal mögliche Kontaktpunkte} \end{cases} \quad (5)$$

Man sieht in Gleichung (3), dass für die Pisa IIT Softhand maximal 16 Kontaktpunkte möglich sind. Hier war die Bestimmung der maximalen Kontaktpunkte sehr einfach, da die Pisa Hand Gelenke besitzt, genauso wie die DLR WHISG Hand.

Diese Hand erreicht eine maximal mögliche Anzahl von acht Kontaktpunkten (s. Gleichung (4)), da sich hier auf die drei Hauptfinger Daumen, Zeige- und Ringfinger beschränkt wurde.

Für die RBO Hand kamen nach reiflicher Überlegung maximal sieben Kontaktpunkte zustande (s. Gleichung (5)). So zählt jeder Finger, egal ob ein Kontakt an der Fingerspitze oder mit dem ganzen Finger erreicht wurde, nur als ein Kontaktpunkt. Hinzu kommen abschließend noch die Handfläche und der Handballen der RBO Hand, die die maximale Anzahl der Kontaktpunkte vervollständigen.

Es ergeben sich für die Griffsicherheit, wie in Gleichung (2) zu erkennen, Werte von 0 bis 1. Dabei beschreibt die 0 den schlechtesten Wert (schlechter Griff) und die 1 den besten Wert (sehr guter Griff). Insgesamt werden vier Bereiche eingeführt, die in Tabelle 3 zu erkennen sind. Ein Wert zwischen 0 und 0,24 liegt im Bereich *Schlecht*. Zwischen 0,25 und 0,49 im Bereich *Mittel*. Der Bereich *Gut* liegt zwischen 0,50 und 0,74 und zuletzt der Bereich *Sehr Gut* mit Werten zwischen 0,75 und 1,00.

0...1			
0...0,24	0,25...0,49	0,50...0,74	0,75...1,00
Schlecht	Mittel	Gut	Sehr Gut

Tabelle 3: Bereiche der Griffsicherheit. Quelle: eigene Einteilung

Hierarchisch ist die Tabelle von oben nach unten zu lesen. Der Gesamtbereich teilt sich in die vier Unterbereiche - mit Bezeichnung darunter - auf. Mit der Betrachtung des Bereiches *Sehr Gut* kann man sicher sagen, dass der entstandene Griff externen Kräften in allen Richtungen trotzen kann - die Griffsicherheit somit maximal ist. Für alle implementierten Greifstrategien gilt die Forderung, so nahe wie möglich an einen Griffsicherheitswert von 1,00 zu kommen.

Da nun der Bewertungsfaktor - die sogenannte Griffsicherheit - für unteraktuierte Roboterhände ohne integrierter Sensorik aufgestellt werden konnte, kann nun mit der Vorstudie fortgefahren werden. Dafür wird aber zunächst der verwendete Versuchsaufbau mit den entwickelten Hilfsmitteln vorgestellt.

8.2 Versuchsaufbau

In Abb. 45 sieht man den Versuchsaufbau, der für die geplante Vorstudie verwendet wurde. In der Vorstudie wurden die verschiedenen Greifstrategien getestet.

Hauptbestandteil des Aufbaus bildet der Octagon Tisch. Dieser Roboterarbeitsplatz beinhaltet eine Anschraubplatte für den Roboter, eine Linearachse und eine Steuereinheit, die unter der Arbeitsfläche verbaut ist. Die Anschraubplatte ist auf der Linearachse befestigt, sodass man einen Roboterarm entlang dieser Linearführung verfahren kann. Die verbauten Steuerung dient zum einen der Ansteuerung der Linearachse und zum anderen der Ansteuerung der seitlich angestellten Fördersysteme. Auch die für den Roboter benötigte Steuerung ist darin enthalten. Für die Vorstudie wird der DLR Leichtbauroboter III benutzt. Genauere Angaben zum LBR wurden bereits im Abschnitt 3 gemacht. Die Fördersysteme (Förderbänder) werden nicht für die Versuche benötigt und können ignoriert werden.

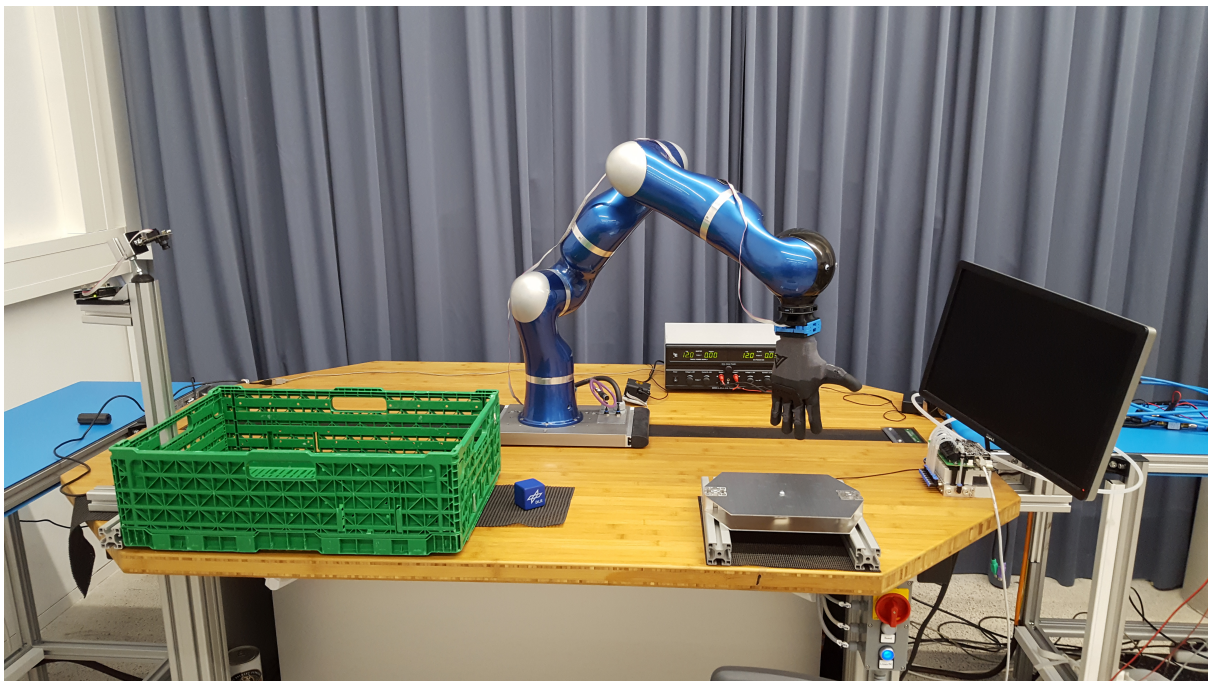


Abbildung 45: Roboterarbeitsplatz. Quelle: eigene Aufnahme

Die Objekte, die gegriffen werden sollen, werden in einem grünen IFCO Behälter positioniert. Dieser ist auf der Arbeitsfläche der Werkbank fest platziert und hat somit eine definierte Position, die der Roboter nutzen kann.

Zum Ablegen der Objekte wurde eine Ablageplatte mit eingebautem Kraftsensor entworfen (s. Abb. 46). Der Kraftsensor ist zwischen zwei Aluminiumplatten mittels zweier Schrauben befestigt. Das Kabel, das vom Sensor wegläuft, führt zu einem Messverstärker, der wiederum mit einem Mikrocontroller verbunden ist. Der Mikrocontroller verarbeitet die vom Sensor bereitgestellten Daten und gibt Integer Werte per USB an einen Rechner aus. Diese Werte werden von einem Python Skript über die Methode `serial.read()` eingelesen und weiter verwendet. So kann anschließend das resultierende Gewicht oder auch die wirkende Kraft berechnet werden. Das Ganze wird verwendet, um den Erfolg der *Pick-and-Place*-Aufgabe, die mit Hilfe eines Griffes in einer bestimmten Greifstrategie abläuft, zu überprüfen. Ebenfalls wurde ein sogenannter *Watchdog* implementiert, der

ständig nach dem resultierenden Gewicht fragt und bei heftiger Einwirkung auf die Platte - zum Beispiel Objekt fallengelassen - eine Fehlermeldung ausgibt. Solange die Aufprallkraft unterhalb des definierten *thresholds* (Grenzwertes) liegt, kann davon ausgegangen werden, dass das Objekt relativ sanft auf der Platte abgelegt wurde. Ist dies nicht der Fall, wird davon ausgegangen, dass das Objekt aus einer Höhe von circa 20 cm fallengelassen wurde oder der Roboterarm beziehungsweise -hand auf die Platte gedrückt hat.

Das große Netzteil im hinteren Bereich des Tisches dient einmal der Versorgung der Steuerbox der Pisa-IIT Softhand und zum anderen mal der Versorgung des Messverstärkers für das Auslesen des Kraftsensors unter der Ablageplatte. Beide werden mit einer Spannung von 12 V versorgt.

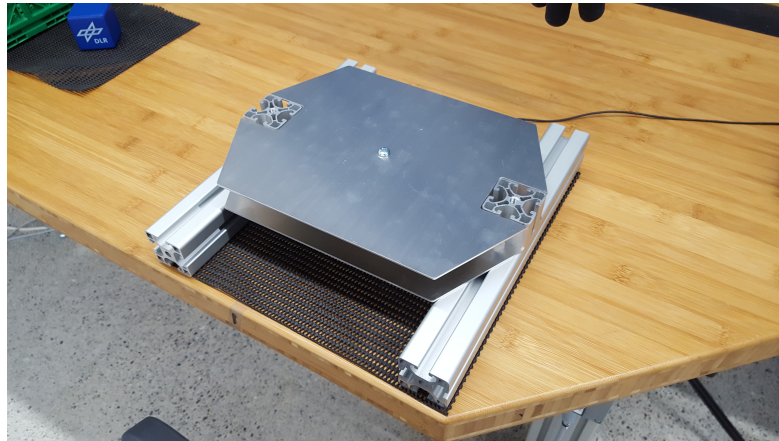


Abbildung 46: Ablageplatte. Quelle: eigene Aufnahme

Da die RBO Hand 2 (s. Abb. 37) mit Druckluft bewegt wird, wurde ein entsprechender Versorgungsanschluss zum Arbeitsplatz gelegt. Dieser Anschluss führt dann zur Steuereinheit der RBO Hand und gewährleistet dessen Funktionsweise (s. Abb. 39).

Um später eine Automation der Anwendung zu realisieren, muss eine Kamera in das System mit eingebunden werden, die die Objektposition in der IFCO Box zurückgibt. Da sämtliche Kameras, die am Institut benutzt werden, auf dem verwendeten Rechner Probleme bei der Integration machten, wurde der *Pixy (CMUcam5) Smart Vision Sensor* (s. Abb. 47) verwendet.

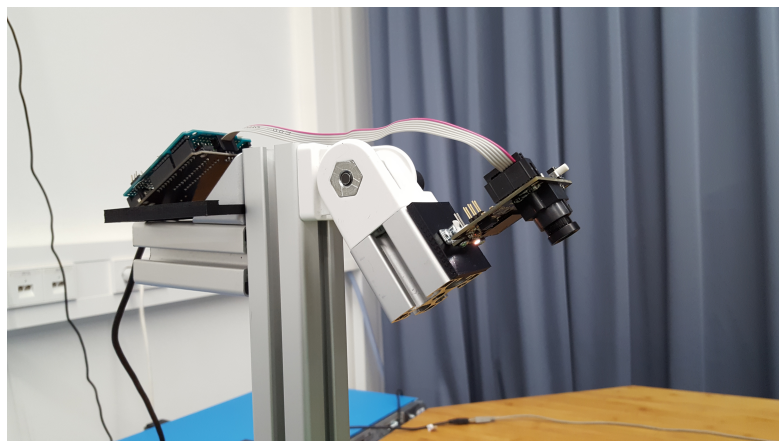


Abbildung 47: Pixy CMUcam5 Smart Vision Sensor. Quelle: eigene Aufnahme

Diesem Sensor kann man ohne großen Aufwand verschiedene Objekte einlernen. Die Kamera reagiert auf Farben und Formen und macht es relativ einfach gelernte Objekte zu erkennen und Objekte zu unterscheiden. Die Ergebnisse der Bildverarbeitung konnten allerdings nicht überzeugen, wie auch schon in Abschnitt 7.3 beschrieben wurde.

Als nächstes kann nun nach Aufstellen der Griffsicherheit und Betrachtung des Versuchsaufbaus mit der Vorstudie begonnen werden.

8.3 Durchführung der Vorstudien

Für die Vorstudie mit fest positioniertem bekannten Objekt, wird das Objekt in eine für die Hand gut zu erreichende Position gebracht. Anschließend wird mit Hilfe des Roboterarmes die entsprechende Roboterhand in diese Position gebracht und versucht das Objekt zu greifen.

Erfolge und Misserfolge werden festgehalten und das Bewertungsschema aus Abschnitt 8.1 wird genutzt. Dabei wird vor allem auf die Finger-, Gliederkontakte und auf den Handflächenkontakt geachtet. Wie in Abschnitt 8 erläutert, wird kein expliziter Griff für den Greifversuch ausgewählt, da der Griff aus der Greifsituation heraus entsteht. Das Objekt soll intuitiv gegriffen und bei Erfolg eine visuelle Inspektion durchgeführt werden.

Der Versuch über den LBR einen Fehlgriff zu erkennen, muss verworfen werden. Das geringe Gewicht mancher Objekte lässt die Überprüfung des Greiferfolges nicht zu, da eine sehr kleine Änderung des Momentes nicht erfasst werden kann.

Pisa-IIT Softhand

Als erstes wird die Durchführung der Vorstudie mit der Pisa-IIT Softhand anhand von Bilderreihen veranschaulicht. Zu beachten sind die Symbole, die sich am Rand befinden. Hier findet man auf der beigelegten DVD, die sich auf der letzten Seite befindet, die entsprechenden Videoaufnahmen unter den aufgezeigten Titeln. Es kann auch während der Beschreibung des Ablaufes das Video anstatt der Bilderreihe hinzugenommen werden. Falls man sich für die Videovariante entscheidet, empfiehlt es sich erst den Fließtext vollständig zu lesen und anschließend das Video anzuschauen.

Top Grasp Strategie



iit_softhand_
banana_topgrasp

Zuerst wird auf die Top Grasp Strategie der Pisa Hand eingegangen. Das Objekt - also die Bananenattrappe - ist in dem Behälter so platziert, dass ein Top Grasp gut ausgeführt werden kann.

Zunächst fährt der Roboter in seine Initialposition. Dann bewegt er sich langsam zur Vorposition IFCO Behälter, wie in Abb. 48 unter (a) zu sehen ist. Man bemerkt sofort, dass der Endeffektor mit dem Roboterarm viel Platz für einen Top Grasp benötigt. Anschließend fährt er, wie unter (b) zu sehen, in die Vorgreifposition (RsS). In dieser Position wird der Greifversuch ausgeführt (HsS). Hier kann man in Bild (c) den ausgeführten Griff betrachten.

Dieser entstandene Griff ähnelt dem Lateral Pinch Grasp (s. Abschnitt 4.2) mit zwei virtuellen Fingern. Der erste VF ist hier der Daumen und der zweite VF der seitliche Teil des Zeigefingers. Sein Opposition Type lässt sich als Side Opposition einteilen, da die Kraftlinie der beiden VF schräg zur Handfläche steht.

Nach visueller Inspektion konnte eine Kontaktpunktzahl von vier festgestellt werden. Der erreichte Bewertungsfaktor K_B (Griffsicherheit) liegt somit bei 0,25. Als nächstes wird nun das Objekt, wie unter (d) zu sehen, zurück in die Vorposition IFCO Behälter gebracht. Der Roboter fährt nun über die Vorposition Ablageplatte in (e) bis zur Position zur Freigabe des Objektes unter (f). Abschließend wird die Banane auf der Ablageplatte positioniert. Der Watchdog konnte keinen Verstoß beim Ablegen feststellen.

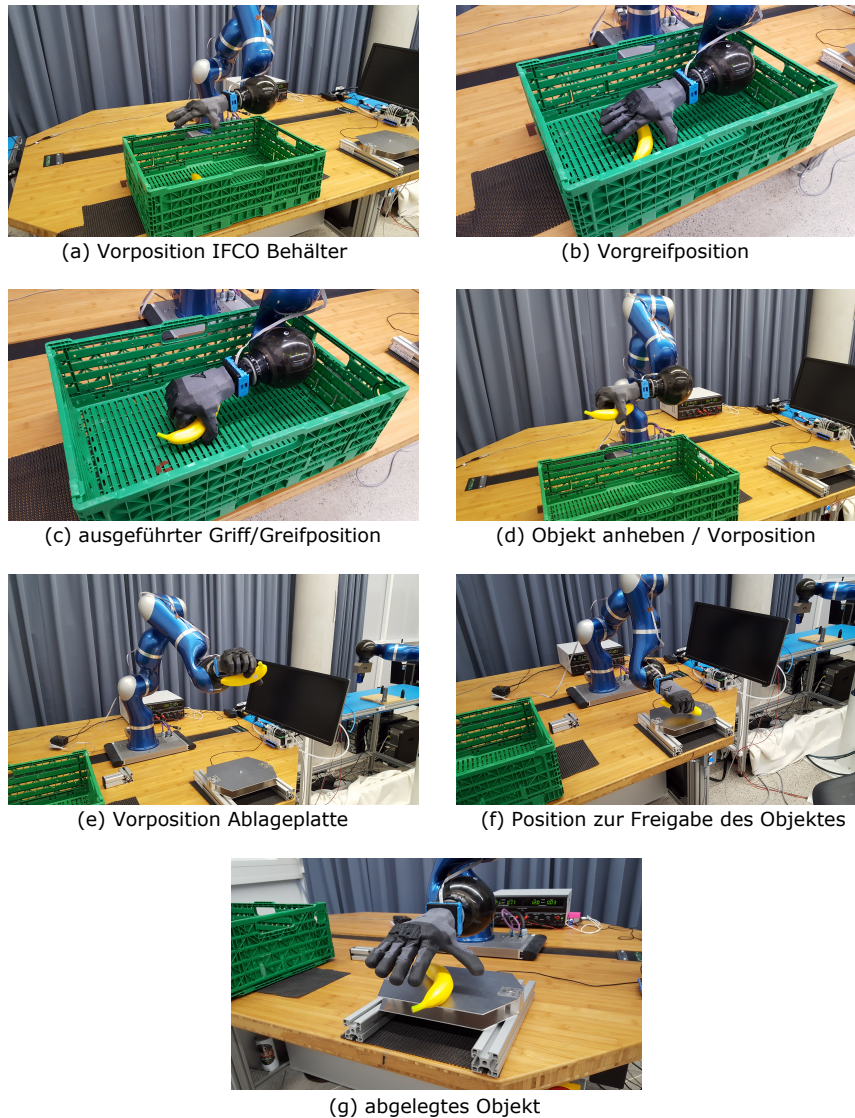


Abbildung 48: Vorstudie Pisa-IIT Softhand Top Grasp. Quelle: eigene Aufnahmen

Environment Constraint Strategie



iit_softhand_
banana_ECgrasp

Als zweites folgt die Environment Constraint Strategie. Hier ist die Bananattrappe nahe an der Wand des IFCO Behälters platziert. Der Roboter fährt zunächst wieder in seine Initialposition. Dann fährt dieser wieder zur Vorposition IFCO Behälter, wie in Abb. 49 (a) zu sehen. Mit dieser Strategie hat die Pisa-IIT Softhand sehr viel Platz im Innenbereich des IFCO Behälters. Das erkennt man gut wenn man unter (b) die Vorposition zum Schieben des Objektes betrachtet. Mit richtig eingestelltem Abstand kann man das Objekt in die Vorgreifposition unter (c) bringen (RsS). Anschließend versucht man mit einer hand-spezifischen Strategie (HsS) unter das Objekt zu kommen, um es so zu umschließen und letztendlich zu greifen.

Als erstes wird versucht, wie unter (d) zu sehen, das Objekt mit Hilfe der Wand des Behälters anzuheben. Man hat hier Schließungsstufen ausgewählt, die zunächst beginnend

bei 7000 bis 17000 (Schließungsgrad) in fünftausender Schritten hochlaufen. Dann wird durch Öffnen der Hand ein Versuch gestartet unter das Objekt zu kommen. Wie in (e) zu betrachten, hatte diese Strategie Erfolg und das Objekt konnte gegriffen werden.

Der entstandene Griff kann einmal in (f) oder besser noch im Video in Sekunde 00:36 angeschaut werden. Dieser ähnelt den Vorbildern Medium Wrap, Large Diameter oder Small Diameter Grasp (s. Abschnitt 4.2). Es sind wieder zwei VF zu erkennen, die sich wie folgt aufteilen. Der erste VF sind die Finger zwei bis fünf, während der zweite VF die Handfläche beinhaltet. Die Stellung des Daumens lässt vermuten, dass der entstandene Griff auch ein Light Tool Grasp (s. Abschnitt 4.2), der einen weiteren optionalen dritten VF (Daumen) enthält, sein kann. Die gedachte Kraftlinie zwischen dem VF1 und dem VF2 steht senkrecht auf der Handfläche. Somit lässt sich der Griff als Palm Opposition Type einteilen.

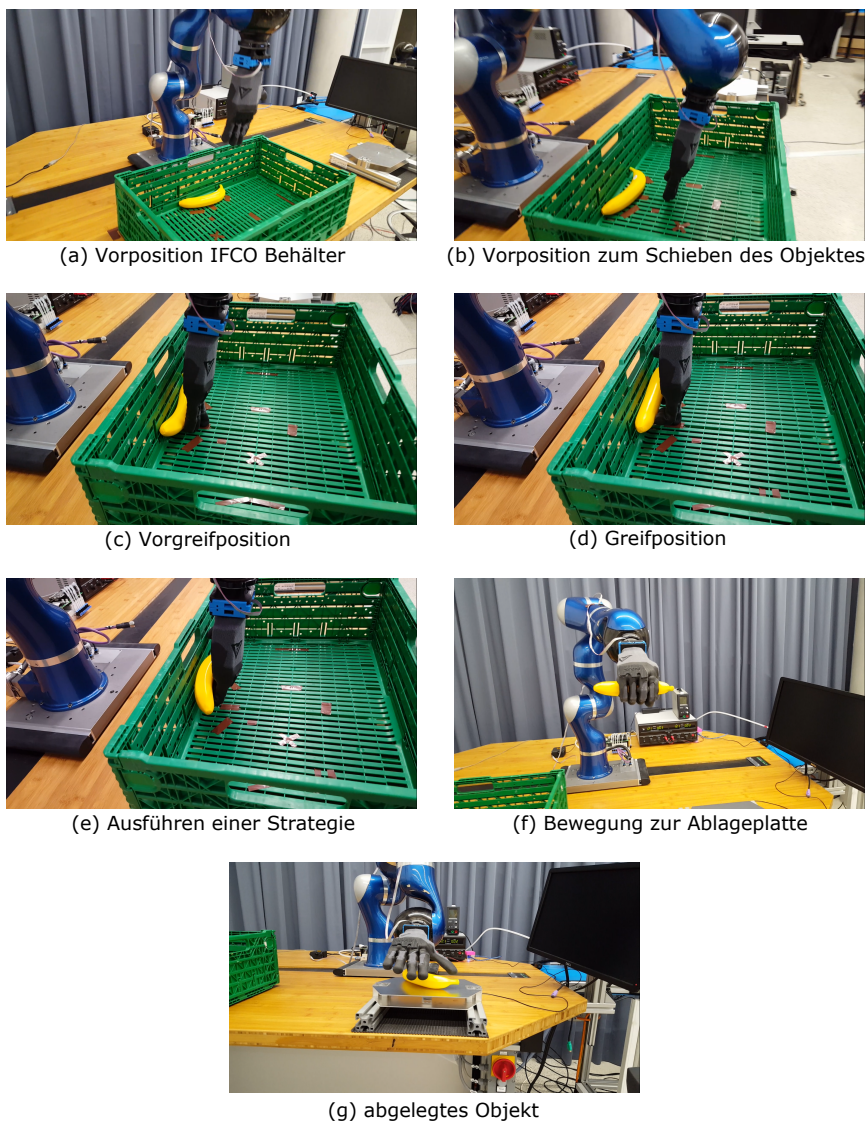


Abbildung 49: Vorstudie Pisa-IIT Softhand EC Grasp. Quelle: eigene Aufnahmen

Nach der visuellen Inspektion konnte eine maximale Kontaktpunktzahl von acht erfasst werden. Die Griffsicherheit wurde anschließend berechnet und ergab den Wert 0,5.

Nun ist in Abb. 49 (f) die Bewegung zur Ablageplatte zu erkennen. In (g) wurde das Objekt planmäßig abgelegt und der Watchdog wurde nicht ausgelöst.

RBO Hand

Als zweites wird die Vorstudie mit der RBO Hand anhand der Bilderreihen aufgezeigt. Es gilt dasselbe wie bei der Pisa Hand. Die DVD Symbole verweisen auf den Videotitel, der sich auf der beigelegten DVD befindet.

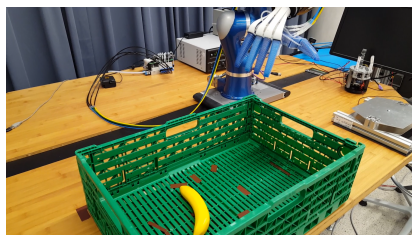
Top Grasp Strategie



Wie beim Abschnitt der Pisa-IIT Softhand wird zuerst mit der Top Grasp Strategie begonnen. Das Objekt wird wieder auf die markierte Stelle in der Top Grasp Region gelegt.

Zunächst fährt der Roboter in seine Home Position. Anschließend fährt er - wie für alle Strategien implementiert - in die Vorposition IFCO Behälter (s. Abb. 50 (a)). Von der Vorposition aus bewegt sich der Arm in Richtung Vorgreifposition, zu sehen unter (b). Diese Position kann in (c) auch noch einmal von Nahem betrachtet werden (RsS).

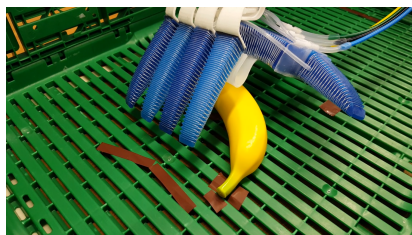
Wie bereits in Abschnitt 5.3 erwähnt wurde, besitzt die RBO Hand keinen opponierenden Daumen, welches eine Top Grasp Strategie fast unmöglich macht.



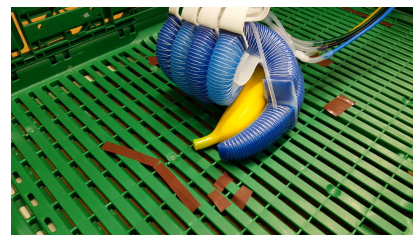
(a) Vorposition IFCO Behälter



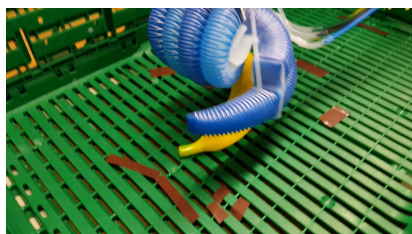
(b) Vorgreifposition



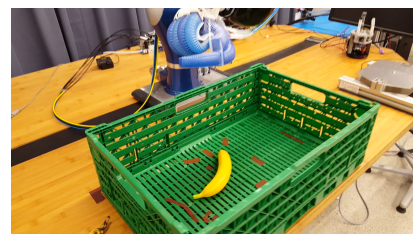
(c) Vorgreifposition (nahe Ansicht)



(d) ausgeführter Griff



(e) Fehlgriff



(f) Fehlgriff zu diesem Zeitpunkt nicht bemerkt

Abbildung 50: Vorstudie RBO Hand 2 Top Grasp. Quelle: eigene Aufnahmen

Deshalb sieht man in (d) und in (e), dass dieser Greifversuch zu keinem Erfolg führt. Der Bewertungsfaktor hat den Wert 0. Der Greifversuch an sich, läuft aber, wie unter (f) bis zum Ende weiter. Dann kann erst durch Betrachten des Watchdog festgestellt werden, dass kein Objekt abgelegt wurde. Dies merkt man, da die Gewichtsanzeige der Platte nicht angestiegen ist. Mit dem LBR konnte, wie bereits erwähnt, keine Überprüfung der Objektaufnahme realisiert werden, da das Gewicht des Objektes zu gering ist.



Beim Greifversuch hat man gemerkt, dass das Objekt einfach beim Schließen der Hand wegrutscht. Es wurde anschließend noch ein Versuch mit einer Gummimatte durchgeführt. Die Matte wird auf den Boden des IFCO Behälters gelegt, um mehr Haftreibung auf das Objekt auszuüben.

Dieser Versuch ist nur als Videoaufnahme zu betrachten und kann auf der DVD gefunden werden.

Es wäre theoretisch möglich eine Top Grasp Strategie mit der RBO Hand auszuführen, wenn man mehr Grip zwischen Boden und Objekt bekommt. Allerdings wird nicht weiter auf diesen Versuch eingegangen, da sich in einer normalen Situation keine Gummimatte in dem IFCO Behälter befindet.

Environment Constraint Strategie



Nach Darstellung der Top Grasp Strategie folgt die Environment Constraint Strategie. Hierzu wurde das Objekt nahe an der Wand platziert.

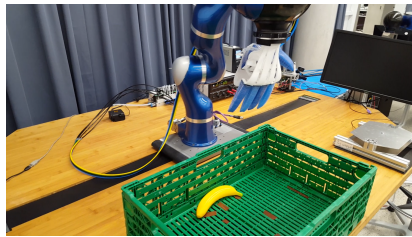
Die Ausführung beginnt zunächst mit Anfahren der Initialposition. Über diese Position fährt der Roboterarm zur Vorposition IFCO Behälter (s. Abb. 51 (a)). Als nächstes bewegt sich der Arm in Richtung der Vorposition zum Schieben des Objektes unter (b). Das Objekt wird dann mit Hilfe der Silikonfinger vom Roboterarm an die Wand gedrückt, was man in Bild (c) betrachten kann (RsS). Es wird versucht die Banane zu greifen (d). Dies passiert mit einer handspezifischen Strategie (HsS). Und zwar wird durch schrittweises Befüllen der Finger eins bis vier (vgl. Abb. 37) versucht, unter das Objekt zu kommen und es so mit Hilfe der Wand in die gekrümmten Finger beziehungsweise in die Handfläche zu bekommen. In (e) sieht man, dass dies nach Ausführen der Strategie möglich war. Wenn die Finger in ihrem letzten Schritt gefüllt wurden, wird der Daumen und der Handballen befüllt, um das Objekt nochmals zu sichern.

Der aus diesem Greifversuch hervorgegangene Griff lässt sich als Adducted Thumb oder Light Tool Grasp identifizieren. Hier sind drei VF für die Greifvariante definiert. Der VF1 ist in diesem Fall die Handfläche, der VF2 die Finger zwei bis fünf und der VF3 der abgespreizte Daumen. Es ist zu beachten, dass die Durchnummerierung der Finger für die RBO Hand (s. Abb. 37) anders als für die Betrachtung der VF (s. Abschnitt 4.1) ist. Trotz der drei VF wird der Opposition Type als Palm Opposition gesehen, da die Hauptarbeit vom VF1 und VF2 ausgeübt wird. Die entstehende Kraftlinie steht somit senkrecht zur Handfläche.

Für die Kontaktpunktzahl wurde der Wert sechs festgestellt. So konnte bei der Griffsicherheit ein Wert von 0,86 erzielt werden.

Als nächstes fährt der Roboterarm mit einer Bewegung zur Ablageplatte (f) und gelangt schließlich in die Vorposition Ablageplatte, zu sehen unter (g). Beim Ablegen des Objektes bleiben kurzzeitig die Finger an der Ablageplatte hängen, was den Watchdog auslöst.

Allerdings war die Ablage des Objektes an sich zufriedenstellend.



(a) Vorposition IFCO Behälter



(b) Vorposition zum Schieben des Objektes



(c) Objekt an Wand geschoben (Greifposition)



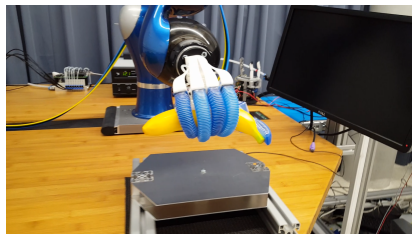
(d) Greifversuch



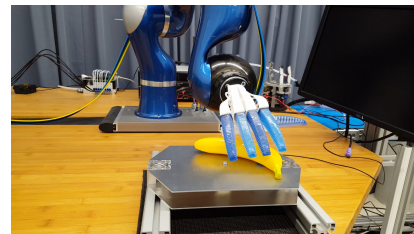
(e) ausgeführter Griff



(f) Bewegung zur Ablageplatte



(g) Vorposition Ablageplatte



(h) abgelegtes Objekt

Abbildung 51: Vorstudie RBO Hand 2 EC Grasp. Quelle: eigene Aufnahmen

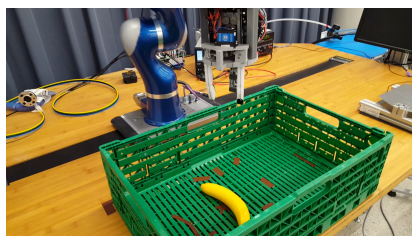
DLR WHISG Hand

Als letztes wird die durchgeführte Vorstudie mit der DLR WHISG Hand aufgezeigt. Da die Hand anders aufgebaut ist als die vorherigen Hände, mussten hier andere Positionen angefahren werden. Die zugehörigen Videoaufnahmen sind wieder auf der beigelegten DVD zu finden.

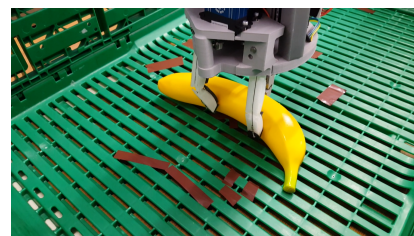
Top Grasp Strategie



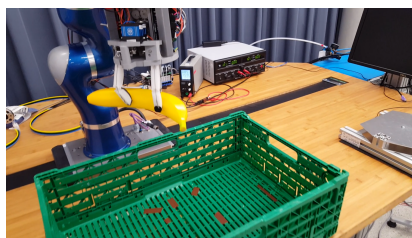
Es wird wie zuvor mit der Top Grasp Strategie angefangen. Das Objekt wird passend - diesmal für die DLR Hand passend - in dem IFCO Behälter platziert. Danach beginnt der Roboterarm, wie bei jedem Versuch, sich in seine Initialposition zu bewegen. Anschließend wird wieder die Vorposition IFCO Behälter, zu sehen in Abb. 52 (a), angefahren.



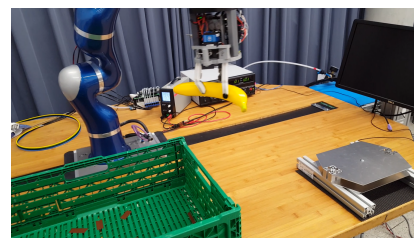
(a) Vorposition IFCO Behälter



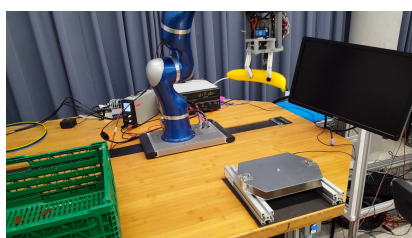
(b) Greifposition



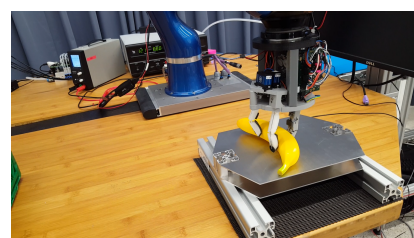
(c) gegriffenes Objekt



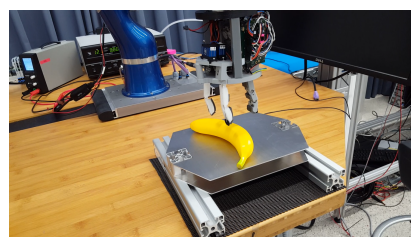
(d) Bewegung zur Ablageplatte



(e) Vorposition Ablageplatte



(f) Ablageposition



(g) abgelegtes Objekt

Abbildung 52: Vorstudie DLR WHISG Hand Top Grasp. Quelle: eigene Aufnahmen

Als nächstes fährt der Arm nach unten in die Greifposition (b), wo der Greifversuch ausgeführt wird (RsS). Als erstes greift die Hand zu und als zweites wird die Steifigkeit des Griffes erhöht (HsS). Das Verstellen der Steifigkeit ist in der Originalaufnahme deutlich als Surren wahrzunehmen.

Der entstandene Griff ähnelt dem Vorbild Thumb-2 Finger Grasp, welcher zwei virtuelle Finger besitzt. Der VF1 ist der Daumen (großer Finger) und der VF2 die Finger zwei bis drei (zwei kleinen Finger). Da hier eine Kraftlinie entsteht, die parallel zur Handfläche verläuft, kann der Pad Opposition Type festgestellt werden.

In (c) kann man nochmals den Griff und das gegriffene Objekt betrachten. Es wurde nach dem Bewertungsschema eine Kontaktpunktzahl von drei vermerkt. Somit ergibt sich eine Griffsicherheit bei der DLR WHISG Hand von 0,375.

Anschließend führt der Roboter unter (d) die Bewegung zur Ablageplatte aus und gelangt schließlich zur Vorposition Ablageplatte, zu sehen in (e). Als letztes wird der Roboterarm in die Ablageposition (f) gebracht, um dort das Objekt sanft abzulegen. Dies konnte auch durch die Betrachtung des Watchdog bestätigt werden.

Environment Constraint Strategie



Abschließend wird noch einmal die Environment Constraint Strategie der DLR WHISG Hand betrachtet. Hier wurde für die Hand das Objekt an die rechte Wand des IFCO Behälter gelegt.

Der Roboter fährt zunächst in seine Initialposition und bewegt sich dann in Richtung Vorposition IFCO Behälter, wie in Abb. 53 (a) zu erkennen. Nun fährt der Roboterarm in die Vorposition Wand unter (b). Ab hier wird versucht mit dem Hauptfinger hinter das Objekt zu kommen. Die Wand des Behälters wird als Führung für den Finger benutzt. Dies erkennt man in Bild (c). Wenn man mit dieser roboterspezifischen Strategie hinter das Objekt gekommen ist, ist man in der sogenannten Vorgreifposition (d). Als nächstes wird der Greifversuch der DLR Hand mit Steifigkeitsverstellung ausgeführt (HsS).

Der entstandene Griff kann unter (e) betrachtet werden. Hier handelt es sich um dieselbe Greifvariante, wie bei der Top Grasp Strategie, da man im Grunde genommen auch eine solche verwendet hat. Das Benutzen der Wand mit dem Finger macht diese Strategie aber dennoch zu einer Environment Constraint Strategie. Die VF, der Opposition Type und die entstandenen Kontaktpunkte weisen ebenfalls denselben Wert auf. Demnach errechnet sich auch derselbe Bewertungsfaktor $K_B = 0,375$.

Zum Schluss wird das Objekt über die Vorposition Ablageplatte (f) zur Ablageposition (g) gebracht. Hier wird das Objekt schließlich unter (h) sanft auf der Platte abgelegt. Auch der Watchdog kann dieses sanfte Ablegen bestätigen, da er nicht ausgelöst hat.

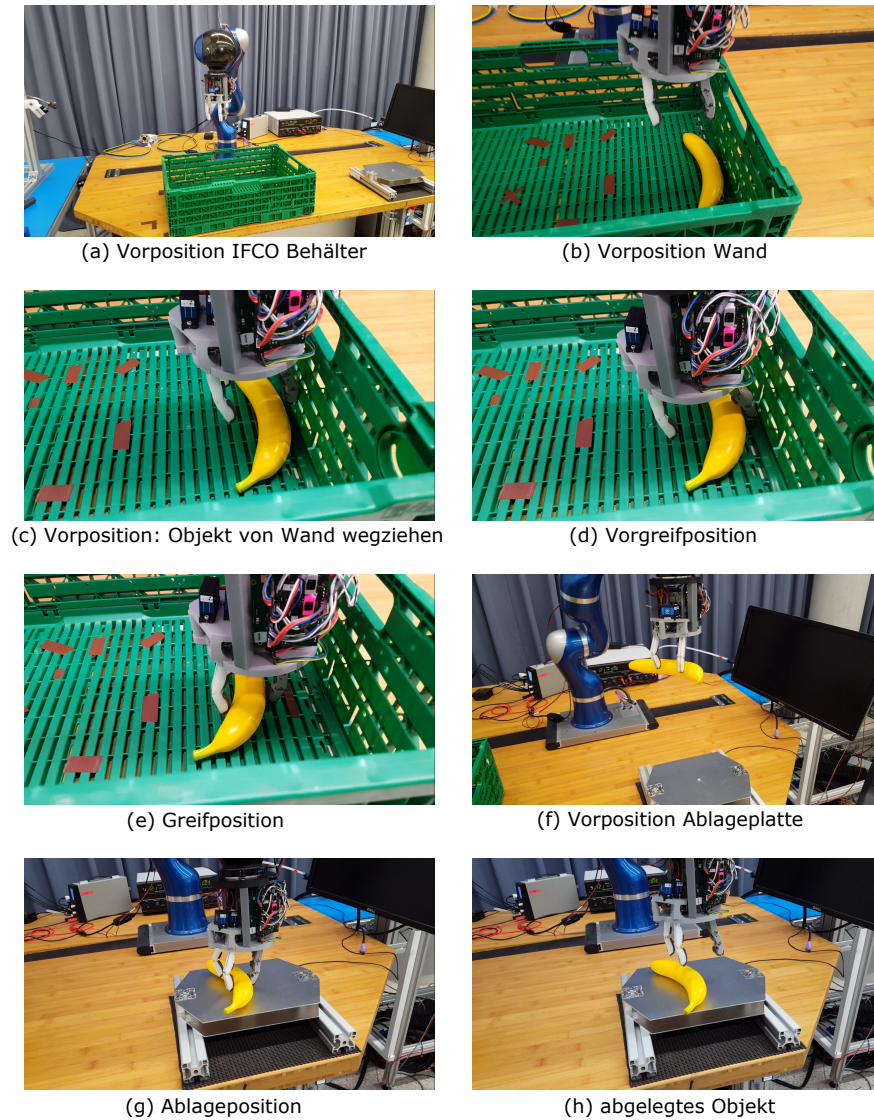


Abbildung 53: Vorstudie DLR WHISG Hand EC Grasp. Quelle: eigene Aufnahmen

Im Abschnitt 8 konnten anhand der Erkenntnis, dass Greifvarianten aus Greifsituationen heraus entstehen und nicht wirklich geplant werden können, Bewertungskriterien aufgestellt werden. Diese Bewertungskriterien wurden in einem Schema festgehalten und daraus der Bewertungsfaktor Griffsicherheit definiert.

Weiter noch wurde der Versuchsaufbau näher erläutert und ausführlich auf die durchgeführte Vorstudie anhand von Bilderreihen oder auch Videoaufnahmen eingegangen. Im Folgenden können nun die verzeichneten Erfahrungen dabei helfen, Kriterien für eine Greifstrategie aufzustellen.

9 Kriterien für eine Greifstrategie

Durch Betrachtung der Simulationsergebnisse und der Vorstudie werden erste Schlüsse in Bezug auf Kriterien für eine Greifstrategie gezogen. Dadurch kann erkannt werden, was wichtig für eine automatisierte Greifstrategie ist. Unter Betrachtung dieser Punkte werden Kriterien definiert. Diese werden als erstes aufgezeigt und genauer erklärt. Im Anschluss ist eine zusammenfassende Tabelle (Tabelle 4) aufgeführt.

Hardware Setup beschreibt den kompletten Hardwareteil und auch die Anforderungen an diese für eine definierte Automationsaufgabe. Vor allem die Komponenten Roboterarm und Roboterhand sind essentiell. Aber auch die Hilfsmittel, die für die Erfolgsprüfung zuständig sind, dürfen nicht vernachlässigt werden. Man benötigt für diese Art von Aufgabe einen Roboterarm, der Kartesische Impedanz Regelung und eine einstellbare Nachgiebigkeit besitzt.

Implementierte Strategien müssen auch für die entsprechende Roboterhand angepasst sein. Hier spielt das Design der Roboterhand eine wichtige Rolle. Wie viele Finger hat die Hand, wie viele Freiheitsgrade besitzt sie und wie viele sind davon aktiv nutzbar. Diese Punkte fallen in das Hardware Setup und müssen auf eine erfolgreiche Greifstrategie abgestimmt sein.

Der Erfolg einer Strategie muss aber erst überprüft werden. So darf man auch die entsprechenden Hilfsmittel nicht vergessen, die die Anforderungen des Use Case validieren.

Bildverarbeitung soll das Herzstück des ganzen Systems sein. Ohne Bilderverarbeitung wäre eine automatisierte Lösung der Greifaufgabe unmöglich. Sie soll Informationen zur Position, Orientierung des Objektes in dem IFCO Behälter und allgemein zur Geometrie des Objektes liefern. Das sind essentielle Punkte, die beim Ausführen einer Greifstrategie zu beachten sind.

Die **Ausgefeilte Logik** ist ebenfalls ein wichtiger Aspekt in Bezug auf eine vollständige Automation. Die von der Bildverarbeitung bereitgestellten Informationen müssen korrekt interpretiert werden und entsprechende Ausführungskonzepte hinterlegt sein.

Korrekt heißt in diesem Fall, dass die Logik die gelieferten Informationen richtig versteht und die richtige Auswahl trifft. Es muss entschieden werden, bei welcher bestimmten Position, Orientierung und Geometrie, welche vordefinierten Konzepte gestartet werden. Es bietet sich an einen Greifexperten zu implementieren, der eine solche Entscheidung selbstständig treffen soll.

Use Case beschreibt in diesem Fall die durch die Ocado Group definierten Anforderungen für eine Verpackungsautomation. Das zu greifende Objekt darf weder bei der Aufnahme, noch bei der Ablage beschädigt und somit in seiner Haltbarkeit beeinträchtigt werden. Ebenfalls muss gewährleistet sein, dass das Objekt während des Transportes von Aufnahme- zu Ablageposition nicht aus der Roboterhand fällt.

Für einen Einsatz einer Verpackungslösung müssen diese Anforderungen eingehalten werden, um den Erfolg und die Zufriedenheit der Kunden zu erfüllen. Allgemein sind mit diesem Punkt *Use Case* Anforderungen, die an die Aufgabenstellung geknüpft sind, gemeint.

Mit **Kommunikation** ist das Kommunizieren der Sensorik mit dem Rechner gemeint. Diese Kommunikation soll unbedingt auch bidirektional funktionieren, da ansonsten der

Ocado Use Case nicht eingehalten werden kann.

Keine Informationen über Ströme im Aktuator, wie sie beispielsweise bei der Pisa-IIT Softhand vorkommen, lassen keine sensitiven Griffe von nachgiebigen Objekten zu. Ebenfalls soll über Sensordaten erfasst werden, ob ein Objekt gegriffen wurde oder ein Fehlgriff vorliegt. Dies war in der durchgeführten Vorstudie nicht der Fall.

Die **Strategie** an sich, soll so gewählt sein, dass sich ein Erfolg der Aufgabenstellung einstellt. Dabei kommt es darauf an, die richtige Kombination zwischen roboter- und handspezifischen Strategien zu finden.

Die Auswahl der Strategie hängt wiederum von der ausgefeilten Logik ab, die entscheiden muss, wann welche Strategie benutzt wird. Über Bildverarbeitung muss die Programmlogik der Strategie auch die richtigen Koordinaten des Objektes übermitteln.

Kriterium	Zusammenfassung
Hardware Setup	Mit Hardware Setup ist der ganze Teil gemeint, der hardwareseitig in einer solchen Aufgabenstellung verwendet wird. Das sind Roboterarm, Roboterhände und Hilfsmittel, die den Erfolg prüfen.
Bildverarbeitung	Für eine komplette Automation der Aufgabe benötigt das System eine funktionierende Bildverarbeitung, die Informationen zur Position, Orientierung und Geometrie des Objektes zurückgibt.
Ausgefeilte Logik	Mit ausgefeilter Logik ist gemeint, dass die Informationen der Bildverarbeitung richtig interpretiert werden. Aus diesen muss hervorgehen, welche Strategie eingeleitet beziehungsweise welche TCP Orientierung und Position benötigt wird.
Ocado Use Case	Die in Abschnitt 2.2 vorgestellten Anforderungen müssen berücksichtigt werden. Die Strategien sollen so gewählt werden, dass ein Verstoß gegen die Anforderungen nicht stattfindet. Auch die gewählten Endeffektoren müssen mit den nachgiebigen Objekten zurecht kommen (nachgiebige Eigenschaften).
Kommunikation	Die Kommunikation der Sensoren (Roboterarm, Roboterhände) zum Rechner und andersherum muss während des kompletten Arbeitsprozesses möglich sein (bidirektional). Eine frühe Erkennung von Fehlgriffen soll ebenfalls gewährleistet werden.
Strategie	Die Strategie, die vom Roboterarm oder von der entsprechenden Roboterhand ausgeführt wird, soll in der Lage sein, das Objekt so zu manipulieren, dass ein erfolgreicher Griff möglich ist. Erfolg kann durch eine gute Kombination aus Roboterarm- und Roboterhandbewegungen erreicht werden.

Tabelle 4: Kriterien für eine Greifstrategie. Quelle: eigene Tabelle

In diesem Kapitel ist über die wichtigsten Kriterien einer Greifstrategie reflektiert werden. Um eine vollständige Automation der Aufgabenstellung umzusetzen, müssen diese Kriterien unbedingt eingehalten werden, da es sonst Probleme bei der Ausführung und Interpretation geben wird. Im nachfolgenden Abschnitt 10 werden die Versuchsergebnisse analysiert und diskutiert. Dabei werden anhand der aufgestellten Kriterien Verbesserungsvorschläge, die man umsetzen könnte, vorgestellt.

10 Analyse und Diskussion der Versuchsergebnisse

In der Analyse und Diskussion der Versuchsergebnisse wird die in Abschnitt 8.3 aufgezeigte Vorstudie betrachtet. Dabei wird auf die entstandenen Greifvarianten (Abschnitt 4.2) und die jeweilige Griffsicherheit (Abschnitt 8.1) eingegangen. Durch Aufstellen von Verbesserungsvorschlägen möchte man nachfolgenden Bearbeitern dieses Forschungsthemas Möglichkeiten aufzeigen, die eine Verbesserung der Ergebnisse erzielen können. Hierfür werden die Kriterien im Abschnitt 9 hergenommen. Zunächst wird ein Blick auf die Ergebnisse der Vorstudie der Pisa-IIT Softhand geworfen.

Die zwei Greifsituationen *Top Grasp* und *Environment Constraint Grasp* führten bei der Pisa Hand zu erfolgreichen Ergebnissen.

Bei der Top Grasp Strategie (s. Abb. 48) wurde festgestellt, dass das Greifen des Objektes von oben, gut mit dieser Hand funktioniert. Das ausgewählte Objekt konnte aufgenommen und ohne merkbare Probleme zur Ablagefläche transportiert werden. Die Ablage des Objektes ist ebenfalls positiv verlaufen, da der Watchdog keine Fehlermeldung am Rechner ausgegeben hat.

Allerdings ist der Bewertungsfaktor Griffsicherheit, mit einem Wert von 0,25, relativ schlecht ausgefallen. Der Wert liegt im mittleren Bereich, da dieser Bereich für einen Wert ab 0,25 definiert ist (s. Abschnitt 8.1). Der entstandene Lateral Pinch Grasp, der situationsbedingt aufgetreten ist, ist nicht über mehr als vier Kontaktpunkte (Griffsicherheit 0,25) hinausgekommen. Die maximale Kontaktpunktzahl liegt bei der Pisa-IIT Softhand bei 16 Kontaktpunkten (Griffsicherheit 1,0).

Bei der Environment Constraint Grasp Strategie, konnten hingegen bessere Ergebnisse erzielt werden. Man bringt das Objekt in die Position der EC Grasp Strategie (s. Abb. 49). Hier konnte mit Hilfe der Wand des IFCO Behälters und durch gezielte Manipulation des Objektes mit dem Roboterarm und der Pisa-IIT Softhand die Kontaktpunktzahl von acht erreicht werden. Damit liegt die Griffsicherheit bei einem Wert von 0,5, welcher dem Bereich Gut zu zuordnen ist. Durch den hier entstandenen Griff, der den Greifvarianten Medium Wrap, Large Diameter, Small Diameter und Light Tool ähnelt, kann ein gutes Greifresultat erzielt werden. Um in den Bereich Sehr Gut zu kommen, müssen noch andere Aspekte berücksichtigt werden. Diese werden nachfolgend diskutiert.

Ausschlaggebend für die geringe Kontaktpunktzahl bei der Top Grasp Strategie ist, dass die Pisa Hand nur im Ganzen geöffnet oder geschlossen werden kann plus die Anordnung des Daumens, welcher nur eine opponierende Bewegung zum Zeigefinger ermöglicht. Das lässt eine In-Hand-Manipulation des Objektes nicht zu. Man könnte versuchen durch eine gezielte Interaktion der Hand mit der Umgebung oder durch Aufstellen einer neuen Strategie die Kontaktpunktzahl zu erhöhen.

Unter Betrachtung des Aspektes Hardware Setup aus Abschnitt 9 könnte man überlegen, der Pisa-IIT Softhand anstatt einem aktiven drei aktive Freiheitsgrade zu verpassen und dadurch versuchen bei der EC Grasp Strategie an der Wand mit dem Zeigefinger das Objekt anzuheben, um so mit den anderen Fingern unter das Objekt zu gelangen.

Auch bei der Top Grasp Strategie könnte diese Funktionalität wiederum einen sichereren Griff nach sich ziehen. Wenn man das Objekt erst mit Daumen und Zeigefinger vorgreift, dann könnte man im Nachhinein durch Schließen der anderen Finger die Kontaktpunktzahl, also die Griffsicherheit, erhöhen. Ebenfalls wäre es sinnvoll den Daumen so zu realisieren, dass er mit allen anderen Fingern eine opponierende Bewegung ausführen kann. Der Daumen könnte somit perfekt platziert werden und keine Drehbewegung des

Objektes bei der Top Grasp Strategie hervorrufen.

Der Punkt Kommunikation (s. Abschnitt 9) müsste ebenfalls nachgebessert werden, da das Auslesen der Ströme während des Betriebes der Hand nicht funktionierten. Wenn das möglich gewesen wäre, hätte man über den fließenden Strom im Aktuator auf die Greifkraft schließen können und somit den Ocado Use Case eingehalten. Um trotzdem eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen, wurden - wie bereits erwähnt - bei den anderen Händen ebenfalls keine Sensordaten interpretiert.

Übersicht der Versuchsergebnisse				
Roboterhand	Grundkonzept (Strategie)	Handspezifische Strategie (umgesetzt)	Erreichte Griffsicherheit	Mögliche Verbesserungen
Pisa-IIT Softhand	Top Grasp	Einfaches Schließen der gesamten Hand (Schließungsrate)	0,25	Mehr aktive Freiheitsgrade; Kommunikation der Hand mit Rechner für Greifkraftkontrolle; Besseren Anfahrpunkt definieren; 90 Grad Adapter (Flansch); Anpassen des Daumendesigns (mit allen Fingern opponieren)
	Lateral Grasp	Nicht umgesetzt	x	Muss umgesetzt werden
	EC Grasp	Wiederholendes Öffnen und Schließen der Hand (Schließungsrate) unter zur Hilfenahme der Wand	0,5	Mehr aktive Freiheitsgrade; Kommunikation der Hand mit Rechner für Greifkraftkontrolle; Bessere handspezifische Strategie implementieren; 90 Grad Adapter (Flansch)

Abbildung 54: Vorstudienergebnisse der Pisa-IIT Softhand. Quelle: eigene Aufnahmen

Abschließend kann gesagt werden, dass trotz einiger Mängel dennoch eine erfolgreiche Vorstudie für die Pisa-IIT Softhand durchgeführt werden konnte und die Aufgabenstellung teilweise erfüllt werden kann. Die Tabelle in Abb. 54 fasst die Versuchsergebnisse zusammen.

Bei der Ausführung der Greifsituationen (Top und EC Grasp) mit der RBO Hand gab es auch Misserfolge zu verzeichnen.

So blieb beim Ausführen der Top Grasp Strategie (s. Abb. 50) der Erfolg aus. Das Objekt konnte - durch den situationsbedingten Lateral Pinch Grasp (s. Abb. 19) - nicht festgehalten werden. Der Griff konnte nicht genug Kraft aufbringen, um das Objekt festzuklemmen. Deshalb rutschte die Bananenattrappe zwischen dem seitlichen Teil des Zeigefingers und dem Daumen hindurch. Die Position der Banane wurde auch durch die Bewegung der Finger verschoben, sodass ein erfolgreicher Griff nicht möglich war.

Daraufhin erhöhte man die Haftreibung auf das Objekt. Dazu wurde eine Gummimatte verwendet, die auf dem Boden des IFCO Behälters ausgebreitet wurde (s. beigelegte DVD). Mit genügend Reibung konnte so ein erfolgreicher Griff ausgeführt werden. Allerdings wird in der realen Anwendung keine Matte im Behälter liegen, also ist dieser Aspekt nicht vertiefend zu beleuchten. Es lässt sich aber festhalten, dass mit genügend Reibung

ein Top Grasp möglich wäre.

Die Environment Constraint Grasp Strategie (s. Abb. 51) führte bei der RBO Hand 2 wiederum zu sehr guten Ergebnissen. Für diese Art von Strategie ist die RBO Hand mit ihrer Fingerform sehr gut ausgelegt, weil die Form des Objektes durch langsames schrittweises Schließen der vier Finger komplett umschlossen werden kann. Dies erfolgt auch durch die gezielte Manipulation des Objektes durch den Roboterarm und -hand unter Benutzung der Wand des IFCO Behälters. Dadurch entsteht ein Adducted Thumb oder Light Tool Grasp, welcher eine Kontaktpunktzahl von sechs aufwies. Somit konnte für die handabhängige Griffsicherheit ein Wert von 0,86 errechnet werden. Dieser Faktor liegt im Bereich Sehr Gut und weist in der gesamten Vorstudie den besten Wert auf.

Um das Maximum von 1,0 zu erreichen, könnte man versuchen die PneuFlex Aktuatoren des Daumens und des Handballens noch weiter zu befüllen. Dies könnte zur Folge haben, dass der noch fehlende Handballen sich an das Objekt anlegt und somit eine maximale Griffsicherheit realisiert werden kann. Allerdings ist man mit dem in der Strategie gefahrenen Druck schon fast an der Grenze zum Maximaldruck der Silikonfinger angekommen. Das schlechte Ergebnis bei der Top Grasp Strategie wird nochmals betrachtet. Dieses kann unter anderem auch auf das Design der Hand zurückgeführt werden. Das Problem ist, dass mit der RBO Hand kein opponierender Daumen, wie beispielsweise beim Vorbild Thumb-Index Finger Grasp (s. Abb. 33) zu sehen, realisiert werden kann. Somit fällt das Greifen von oben sehr schwer. Hier müsste unter der Betrachtung des Kriteriums Hardware Setup (s. Abschnitt 9) das Design der Hand verändert werden. Und zwar in der Art und Weise, dass der Daumen mit allen anderen Fingern opponieren kann.

Übersicht der Versuchsergebnisse				
Roboterhand	Grundkonzept (Strategie)	Handspezifische Strategie (umgesetzt)	Erreichte Griffsicherheit	Mögliche Verbesserungen
RBO Hand 2	Top Grasp	Einfaches Schließen der gesamten Hand durch Anpassen der Steuersignale	0	Mehr aktive Freiheitsgrade; 90 Grad Adapter (Flansch); Anpassen des Daumendesigns (mit allen Fingern opponieren)
	Lateral Grasp	Nicht umgesetzt	x	Muss umgesetzt werden
	EC Grasp	Schrittweises Schließen der vier Finger unter zur Hilfenahme der Wand	0,86	Anpassen der handspezifischen Strategie (Stereosignale); 90 Grad Adapter (Flansch)

Abbildung 55: Vorstudienergebnisse der RBO Hand 2. Quelle: eigene Tabelle

Zusammenfassend lässt sich für die Vorstudie der RBO Hand 2 trotz des Misserfolges der Top Grasp Strategie sagen, dass gute Ergebnisse erzielt werden konnten. Unter der Benutzung der EC Grasp Strategie sogar das beste Ergebnis der Vorstudie. Eine Übersicht der Ergebnisse ist in der Tabelle der Abb. 55 zu finden.

Wenn man nun abschließend die Vorstudie der DLR WHISG Hand betrachtet, kann man einen konstanten Erfolg der beiden Strategien verzeichnen.

Bei der Top Grasp Strategie (s. Abb. 52) konnte das Objekt sehr einfach von der Hand aufgenommen werden. Der komplette Ablauf der Strategie verlief ohne auffällige Probleme. Auch bei der Ablage des Objektes auf der Ablageplatte, konnte durch den Watchdog

kein Verstoß des Ocado Use Cases festgestellt werden.

So erreichte man mit einer Kontaktpunktzahl von drei einen Wert der Griffsicherheit von 0,375. Insgesamt sind mit der DLR WHISG Hand aber acht Kontaktpunkte möglich. Mit dem entstandenen Thumb-2 Finger Grasp landete man folglich im mittleren Bereich der Griffsicherheit.

Dasselbe Ergebnis wurde bei der Ausführung der EC Grasp Strategie in Abb. 53 erzielt. Hier konnte mit Hilfe der zur Verfügung gestellten Umwelt unter der Benutzung des Hauptfingers das Objekt von der Wand separiert werden. Mit Hilfe dieser Strategie kam man zwischen Objekt und Wand und konnte dieses durch einen Greifversuch aufnehmen. Die Realisierung einer solchen Strategie ist dem ebenfalls nachgiebigen Verhalten der Finger der DLR Hand zu verdanken. Auch hier entstand ein Thumb-2 Finger Grasp mit einer Griffsicherheit von 0,375.

Um nun einen höheren Wert für die Griffsicherheit zu erreichen, könnte man beispielsweise bei der handspezifischen Strategie nachbessern.

Eine Möglichkeit wäre es durch gezielte Bewegungen der Finger das Objekt nach oben in Handflächenkontakt zu bringen. Da der Hauptfinger und die zwei kleineren Finger der WHISG Hand unabhängig voneinander angesteuert werden können, könnte mit einer solchen In-Hand-Manipulation die Kontaktpunktzahl erhöht werden. Wäre dies möglich, könnte man mit einer solchen Manipulation die Anzahl der Kontaktpunkte auf sieben und bei etwas größeren Objekten als die Bananenattrappe auf acht erhöhen. Dadurch könnte man Werte von 0,875 und 1,0 erreichen und im Bereich Sehr Gut liegen. Damit wäre dann die maximale Griffsicherheit realisiert. Allerdings könnte es bei dieser Überlegung Probleme geben. Wenn der Hauptfinger nicht richtig unter das Objekt kommt, könnte dieser somit nicht in der Lage sein, eine nach oben gerichtete Kraft auf das Objekt auszuüben. Es müsste höchstwahrscheinlich in weiteren Experimenten überprüft werden.

Aber auch die Nachgiebigkeit der Hand könnte man noch weiter in Anspruch nehmen, indem man mit der DLR Hand noch näher an den Boden der IFCO Box oder sogar in Kontakt mit dem Boden fahren würde. Dadurch könnte man direkt unter das Objekt kommen oder man knickt das vorderste Glied des Hauptfingers schon so ein, dass derselbe Effekt - nämlich unter das Objekt zu kommen - erzielt werden könnte.

Weiter lässt sich sagen, dass die DLR WHISG Hand einen wichtigen Vorteil besitzt: Die implementierte Verstellbarkeit der Steifigkeit der Hand. Wie sich beim Menschen die Muskeln anspannen können, wird bei der Hand die Vorspannung der Feder verändert, um die Steifigkeit zu variieren.

Schließlich kann festgehalten werden, dass die Vorstudie mit der DLR WHISG Hand ebenfalls positive Ergebnisse hervorbrachte. An der handspezifischen Strategie kann allerdings, wie bei den anderen Händen auch, noch gefeilt werden. Eine Übersicht der Ergebnisse erhält man beim Betrachten der Tabelle in Abb. 56.

Übersicht der Versuchsergebnisse				
Roboterhand	Grundkonzept (Strategie)	Handspezifische Strategie (umgesetzt)	Erreichte Griffsicherheit	Mögliche Verbesserungen
DLR WHISG Hand	Top Grasp	Einfaches Schließen der drei Finger und anschließendes Verstellen der Fingersteifigkeit	0,375	Handspezifische Strategie: In-Hand-Manipulation (Griffsicherheit erhöhen); Anpassen des TCP Abstandes zum Tisch (unter das Objekt kommen)
	Lateral Grasp	Nicht umgesetzt	x	Muss umgesetzt werden
	EC Grasp	Führung des Hauptfingers hinter das Objekt unter zur Hilfenahme der Wand mit anschließender Schließung und Steifigkeitsverstellung der Hand	0,375	Handspezifische Strategie: In-Hand-Manipulation (Griffsicherheit erhöhen)

Abbildung 56: Vorstudienergebnisse der DLR WHISG Hand. Quelle: eigene Tabelle

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Vorstudie mit den unterschiedlichen Roboterhänden sehr positiv ausgefallen ist. Es muss zwar noch an einigen Ecken und Kanten gefeilt werden, aber für die ersten entwickelten Strategien haben diese recht gut funktioniert.

Jede der Roboterhände weist ihre Stärken und ihre Schwächen auf. Die Pisa-IIT Soft-hand kann durch ihr Design einen Top Grasp und einen EC Grasp sehr gut ausführen. Allerdings kann bei einem Top Grasp durch die Daumenstellung, welche beim Schließen nur mit dem Zeigefinger opponiert, kein vollständiger Griff realisiert werden. Man kann beispielsweise somit keinen Thumb-4 Finger Grasp umsetzen.

Die RBO Hand 2 kann mit ihrem Fingerdesign den EC Grasp sehr gut ausführen. Die nicht opponierende Eigenschaft des Daumens macht jedoch Top Grasps fast unmöglich. Bei der DLR WHISG Hand können beide Greifsituation (Top Grasp und EC Grasp) gut abgedeckt werden. Die handspezifischen Strategien ließen allerdings nur einen geringen Griffsicherheitswert zu.

Es gilt „nur“ die richtige Greifstrategie unter der Berücksichtigung der in Abschnitt 9 definierten Kriterien zu entwerfen, die die Stärken fördert und die Schwächen kompensiert.

Ein wichtiger Punkt ist dennoch zu erwähnen. Für die Ausführung der Vorstudie als EC Grasp Strategie ergaben sich - im Gegensatz zur Top Grasp Strategie - in jedem Fall entweder bessere oder gleichbleibende Werte für die Griffsicherheit. Man kann also zusammenfassend sagen, dass durch Benutzung der zur Verfügung gestellten Umwelt die unteraktuierten Roboterhände bessere Ergebnisse erzielen konnten.

Wenn man die in Abschnitt 6.2 aufgestellten Greifstrategien mit den umgesetzten Strategien vergleicht, merkt man, dass mit dieser durchaus erfolgreichen Umsetzung dennoch nur an der Spitze des Eisberges gekratzt wurde. Deshalb werden die nicht umgesetzten Greifstrategien in diesem Teil erläutert. An manchen Bereichen wurde nämlich im Rahmen dieser Arbeit schon getüftelt.

Zunächst wird aber auf die einzelnen Strategien eingegangen.

Die *Region Depending Strategy* definiert verschiedene Bereiche in dem IFCO Behälter. Infolgedessen können für die Grundkonzepte Top, Lateral und EC Grasp jeweils verschiedene Arbeitsbereiche im Behälter festgelegt werden. Diese Bereichseinteilung findet programmseitig (Python) in der Klasse *GraspDeterminer* statt.

Die Aufgabe der Bildverarbeitung ist es nun die Position, die Orientierung und die Geometrie des Objektes zu bestimmen. Über den Programmcode wird die errechnete Position mit den definierten Bereichen verglichen. Danach wird eine Entscheidung getroffen, welcher Bereich die gelieferte Position beinhaltet. Vorher wird allerdings die Position geprüft, ob diese auch möglich ist. Falls eine Übereinstimmung vorliegt, wird die entsprechende Instanzvariable Top, Lateral oder EC Grasp auf *True* gesetzt. Für weitere Informationen werden die jeweiligen Abstände zu den vier Wänden des Behälters berechnet. Diese Abstände und das ausgewählte Grundkonzept sollen anschließend genutzt werden, um eine passende Greifstrategie auszuführen.

Bis jetzt wurden aber nur die Rahmenprüfungen in der Klasse *GraspDeterminer* definiert. Über die aufgenommene Orientierung des Objektes, soll später auch die Orientierung des TCPs in Bezug auf das gewählte Grundkonzept abgeleitet werden. So könnte auch für den Umgang mit verschiedenen Geometrien der Objekte, ein entsprechender Experte implementiert werden, der die Form in einfachen Geometrien beschreibt und den Mittelpunkt des Objektes über die Bildverarbeitung errechnet. So könnte aus der *Region Depending Strategy* eine größere und flexiblere Strategie entstehen. Namentlich wurde diese ebenfalls in Abschnitt 6.2 erwähnt.

Strategy for Online Selection of Grasps: Mit dieser Strategie soll es möglich sein, auf Ungenauigkeiten zu reagieren und diese somit zu kompensieren. Diese Kompensation muss auch durch Anpassung der handspezifischen Strategien erfolgen.

Man könnte aber auch durch Änderungen am Handdesign (Flansch) einen höheren Erfolg verzeichnen. Beispielsweise könnte man bei der Pisa-IIT Softhand und bei der RBO Hand 2 einen 90 Grad Adapter entwerfen. Damit könnte verhindert werden, dass der Leichtbauroboter mit seiner Kugel, die zwischen Gelenk sechs und sieben sitzt, beim Greifen komplett mit in den IFCO Behälter geführt werden muss. Man hätte bei einer Top Grasp Strategie nur die Länge der Roboterhand im Behälter und könnte somit auch einen größeren Top Grasp Bereich abdecken.

Allerdings müsste sich der Roboterarm bei einer EC Grasp Strategie stark verdrehen beziehungsweise könnte die Pose aus der Vorstudie gar nicht erreichen.

Wichtig ist auf jeden Fall, dass die unter Abschnitt 9 aufgestellten Kriterien beachtet werden und versucht wird für die in Abschnitt 8.1 eingeführte Griffsicherheit einen Wert nahe Eins zu erreichen. Nur im Zusammenspiel aller Komponenten miteinander kann eine erfolgreiche Automation des Prozesses ermöglicht werden.

11 Zusammenfassung und persönliches Fazit

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Ziel der Bachelorarbeit zum Teil umgesetzt werden konnte.

Durch Betrachtung des Projektes SoMa und des Ocado Use Cases wurden die Aufgaben der Arbeit erfasst. Das Erproben von Greifstrategien für unteraktuierte Hände wurde als Hauptziel aufgezeigt. Hierfür mussten verschiedene Komponenten, wie etwa die Bildverarbeitung und Hilfsmittel zum Überprüfen des Use Cases in ein System integriert werden. Ein wichtiges Ziel bildete dabei auch die Untersuchung, ob und wann es sich lohnt die Umwelt als Hilfsmittel für einen Greifversuch zu benutzen. Dazu wurden Grundlagen zum verwendeten Leichtbauroboter erläutert. Ein Hauptbestandteil der Thesis wurde im Kapitel *Literaturrecherche zu Greifvarianten* vorgestellt. Hier wurden verschiedene Definitionen zur Beschreibung einer Greifvariante beschrieben und passende Griffe eingeführt. Durch das recherchierte Wissen wurden Annahmen zu den möglichen ausführbaren Greifvarianten der Roboterhände, die ebenfalls ausführlich erläutert wurden, gemacht. Durch diese Annahmen wurde im nächsten Schritt eine Recherche zu Greifstrategien durchgeführt. Aufgrund mangelnder Literatur in diesem Bereich wurden schließlich eigene Strategien entwickelt und der wichtige Unterschied zwischen Greifvariante und Greifstrategie erklärt. Aus diesen Überlegungen wurden die Strategien in Programmcode umgewandelt und anschließend anhand von Vorstudien validiert. Da für die Roboterhände keine Greifvariante geplant ausgeführt werden kann, da diese aus der Greifsituation heraus entsteht, wurden diese anhand eines Bewertungsschemas qualitativ untersucht (*performance measures*). Die entstandenen Griffe wurden nach der Anzahl ihrer visuell erfassten Kontaktpunkte in sogenannte Griffsicherheitsbereiche eingeteilt. Dadurch konnten entstandene Greifvarianten von unteraktuierten Roboterhänden ohne Sensorik bewertet werden. Nachdem dieses Schema eingeführt wurde, wurde der Versuchsaufbau und schließlich die Vorstudie mit fest positionierten bekannten Objekten durchgeführt. Eine komplette Automation der Greifaufgabe wurde aufgrund von nicht funktionierender Bildverarbeitung nicht realisiert. Deshalb wurde sich auf zwei Greifsituationen, in denen das Objekt (Bananenattrappe) an zwei Positionen im IFCO Behälter fest platziert wurde, konzentriert. Bei der Ausführung der zwei Greifsituationen *Top Grasp Strategy* und *Environment Constraint Grasp Strategy* wurden positive Ergebnisse erzielt.

Man konnte mit der RBO Hand 2 beispielsweise bei der EC Grasp Strategy die besten Resultate in der Vorstudie mit einer Griffsicherheit von 0,86 erzielen. Letztendlich wurde aber für alle Roboterhände eine Verbesserung der Griffsicherheit unter der Benutzung der Umwelt (EC Grasp Strategy) festgestellt. Ausnahme ist die DLR WHISG Hand gewesen, da diese sowohl bei der Top Grasp Strategy als auch bei der EC Grasp Strategy dieselben Werte für die Griffsicherheit aufzeigte. Ausführlichere Betrachtungen der Ergebnisse sind dem Abschnitt 10 zu entnehmen. Aus den aufgenommenen Erfahrungen in Abschnitt 8 wurden grundsätzliche Kriterien, die essentiell für eine Greifstrategie sind, aufgestellt. Danach wurden die Versuchsergebnisse ausführlich und kritisch betrachtet. Es wurden zwar schon sehr gute Resultate erreicht, an manchen Stellen ist aber auch noch Nachholbedarf. In Abschnitt 10 wurden auch anhand der vorher definierten Kriterien für eine Greifstrategie Verbesserungsvorschläge in Bezug auf die Strategien vorgestellt.

Abschließend lässt sich sagen, dass mit der Durchführung der Vorstudie ein guter Grundstein in Hinsicht auf eine komplette Automation der Greifaufgabe gelegt wurde. Man ist nun in der Lage entstehende Greifvarianten unteraktuierter Roboterhände zu bewerten

und Greifstrategien anhand der aufgestellten Kriterien zu entwickeln.

Da nun die Bearbeitung der Bachelorarbeit nochmals komplett zusammengefasst wurde, folgt ein persönliches Fazit: Ich kann sagen, dass die Bearbeitung der Arbeit mit dem Titel *Greifstrategien für unteraktuierte Hände* sehr viel Spaß machte. Mir wurde bei der Planung und bei der Ausführung seitens des DLR sehr viel Freiraum gelassen, sodass ich eigene Überlegungen und Vorstellungen umsetzen konnte. Auch die Betreuung empfand ich als sehr gut, da ich eigenständig arbeiten konnte und bei auftretenden Problemen immer auf Hilfe zählen konnte. Das entgegengebrachte Interesse der Kollegen an einer fremden Arbeit haben mich sehr fasziniert, da das bei Studentenarbeiten nicht immer unbedingt der Fall ist.

Mit der Umsetzung der Aufgabenstellung bin ich im Großen und Ganzen zufrieden. Schade ist aber, dass keine der Kameras funktionierte oder nur ungenaue Informationen ausgab und diese Integration der Kamera in das System somit verworfen werden musste. Gerne hätte ich versucht eine Automation auch in einem größeren Ausmaß zu entwickeln, aber dies war durch die Menge an Punkten, die beachtet werden müssen, so gut wie unmöglich. Mit der Dokumentation und dem Aufbau der Arbeit wollte ich recherchierte Greifvarianten und -strategien in einer wissenschaftlichen Arbeit vereinen, da in der Literatur oft nur Veröffentlichungen mit diesen beiden Bereichen in getrennter Form vorliegen. Aus der Arbeit können detaillierte Informationen zu Greifvarianten und möglichen Greifstrategien gezogen werden. Außerdem ist man in der Lage für die unteraktuierten Roboterhände Griffe mit Hilfe des Bewertungsschemas in verschiedene Bereiche der Griffsicherheit einzuteilen. Ebenfalls kann man aus der Betrachtung der Kriterien für eine Greifstrategie wichtige Schlüsse auf deren Entwicklung ziehen.

Abbildungsverzeichnis

1	LBR III mit der DLR Hand II	7
2	Assistenzroboter ANNiE	8
3	Assistenzsystem DLR EDAN	8
4	SoMa	10
5	Grüner IFCO Behälter	11
6	Leichtbauroboter LBR III	13
7	Mechatronisches Design	15
8	Bauteile Harmonic Drive Getriebe	16
9	Blockdiagramm Joint Level Control	17
10	Regelungsschema für Momenten- und Positionsregelung	18
11	Regelungsschema für Kartesische Impedanz Regelung	19
12	Space Justin	20
13	DLR MiroSurge	21
14	DLR Haptisches Interaktionsgerät HUG	21
15	Schnittmenge (feasible Grasps) der festgelegten Bedingungen	23
16	Gegenspielerarten (Opposition Types) einer greifenden Hand: (a)Pad Op- position (b)Palm Opposition (c)Side Opposition (d) Hand Coordinate System	24
17	Greifvarianten nach Cutkosky	25
18	Griff 18: Extension Type Grasp	26
19	Griff 16: Lateral Pinch Grasp	27
20	Griff 10: Power Disk Grasp	27
21	Griff 11: Power Sphere Grasp	27
22	Griff 3: Medium Wrap Grasp	28
23	Griff 4: Adducted Thumb Grasp	28
24	Griff 5: Light Tool Grasp	29
25	Griff 1: Large Diameter Grasp	29
26	Griff 2: Small Diameter Grasp	30
27	Griff 12: Precision Disk Grasp	30
28	Griff 13: Precision Sphere Grasp	30
29	Griff 14: Tripod Grasp	31
30	Griff 6: Thumb-4 Finger Grasp	31
31	Griff 7: Thumb-3 Finger Grasp	32
32	Griff 8: Thumb-2 Finger Grasp	32
33	Griff 9: Thumb-Index Finger Grasp	32
34	Analytische Qualitätskriterien zur Beschreibung eines Griffes	34
35	Pisa-IIT Sofhand	36
36	Schemata zur Erläuterung der Pisa-IIT-Handfunktion	37
37	RBO Hand 2	39
38	Wirkungsweise der PneuFlex Aktuatoren	40
39	Steuereinheit <i>airserver</i>	41
40	DLR WHISG Hand	42
41	DLR Flexible Antagonistic Spring Element	43
42	Nylon Finger und Differential Mechanismus	43
43	Aufbau einer Greifstrategie	46
44	Vorgehensweise zur Bestimmung der Griffsicherheit	53

45	Roboterarbeitsplatz	55
46	Ablageplatte	56
47	Pixy CMUcam5 Smart Vision Sensor	56
48	Vorstudie Pisa-IIT Softhand Top Grasp	59
49	Vorstudie Pisa-IIT Softhand EC Grasp	60
50	Vorstudie RBO Hand 2 Top Grasp	61
51	Vorstudie RBO Hand 2 EC Grasp	63
52	Vorstudie DLR WHISG Hand Top Grasp	64
53	Vorstudie DLR WHISG Hand EC Grasp	66
54	Vorstudienergebnisse der Pisa-IIT Softhand	71
55	Vorstudienergebnisse der RBO Hand 2	72
56	Vorstudienergebnisse der DLR WHISG Hand	74

Tabellenverzeichnis

1	Technische Daten des LBR III	14
2	Unterscheidung Greifstrategie vs. Greifvariante	45
3	Bereiche der Griffsicherheit	54
4	Kriterien für eine Greifstrategie	68

Literatur

- [ABR⁺16] ARTIGAS, Jordi ; BALACHANDRAN, Ribin ; RIECKE, Cornelia ; STELZER, Martin ; WEBER, Bernhard ; RYU, Jee-Hwan ; ALBU-SCHAEFFER, Alin: KONTUR-2: force-feedback teleoperation from the international space station. In: *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* IEEE, 2016, S. 1166–1173
- [ASOH07] ALBU-SCHÄFFER, Alin ; OTT, Christian ; HIRZINGER, Gerd: A unified passivity-based control framework for position, torque and impedance control of flexible joint robots. In: *The International Journal of Robotics Research* 26 (2007), Nr. 1, S. 23–39
- [Cut89] CUTKOSKY, Mark R.: On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks. In: *IEEE Transactions on robotics and automation* 5 (1989), Nr. 3, S. 269–279
- [DB15] DEIMEL, Raphael ; BROCK, Oliver: A novel type of compliant and underactuated robotic hand for dexterous grasping. In: *The International Journal of Robotics Research* (2015), S. 0278364915592961
- [DLR16a] DLR, Deutsches Z.: *Assistenzrobotik für Menschen im Rollstuhl*. Abgerufen: 2016-08-09. http://www.dlr.de/rmc/rm/DesktopDefault.aspx/tabid-11327/19888_read-46405/gallery-1/gallery_read-Image.52.27542/. Version: 2016
- [DLR16b] DLR, Deutsches Z.: *DLR Leichtbauroboter III*. Abgerufen: 2016-11-19. http://www.dlr.de/rmc/rm/desktopdefault.aspx/tabid-3803/6175_read-8963/. Version: 2016
- [DLR16c] DLR, Deutsches Z. e.: *Laufende Projekte*. Abgerufen: 2016-09-13. <http://www.dlr.de/rm/desktopdefault.aspx/tabid-8432/>. Version: September 2016
- [FHRG16] FRIEDL, Werner ; HÖPPNER, Hannes ; ROA, Maximo ; GREBENSTEIN, Markus: WHISG - A wearable hand to investigate passive stiffness while grasping. In: *SoMa* (2016)
- [FREK] FEIX, Thomas ; ROMERO, Javier ; EK, CarlHenrik ; KRAGIC, Danica: *Human Grasping Database*. Abgerufen: 2016-11-06; <http://grasp.xief.net/>,
- [FRS⁺16a] FEIX, Thomas ; ROMERO, Javier ; SCHMIEDMAYER, Heinz-Bodo ; DOLLAR, Aaron M. ; KRAGIC, Danica: The GRASP taxonomy of human grasp types. In: *IEEE Transactions on Human-Machine Systems* 46 (2016), Nr. 1, S. 66–77
- [FRS⁺16b] FEIX, Thomas ; ROMERO, Javier ; SCHMIEDMAYER, Heinz-Bodo ; DOLLAR, Aaron M. ; KRAGIC, Danica: The GRASP taxonomy of human grasp types. In: *IEEE Transactions on Human-Machine Systems* 46 (2016), Nr. 1, S. 66–77

- [GAC⁺13] GODFREY, SB ; AJODANI, A ; CATALANO, M ; GRIOLI, G ; BICCHI, A: A synergy-driven approach to a myoelectric hand. In: *Rehabilitation Robotics (ICORR)*, 2013 IEEE International Conference on IEEE, 2013, S. 1–6
- [GASB⁺11] GREBENSTEIN, Markus ; ALBU-SCHÄFFER, Alin ; BAHLS, Thomas ; CHALON, Maxime ; EIBERGER, Oliver ; FRIEDL, Werner ; GRUBER, Robin ; HADDADIN, Sami ; HAGN, Ulrich ; HASLINGER, Robert u. a.: The DLR hand arm system. In: *Robotics and Automation (ICRA)*, 2011 IEEE International Conference on IEEE, 2011, S. 3175–3182
- [HAS08] HIRZINGER, G. ; ALBU-SCHAEFFER, A.: Light-weight robots. In: *Scholarpedia* 3 (2008), Nr. 4, S. 3889. – revision #91429
- [HHK⁺11] HULIN, Thomas ; HERTKORN, Katharina ; KREMER, Philipp ; SCHÄTZLE, Simon ; ARTIGAS, Jordi ; SAGARDIA, Mikel ; ZACHARIAS, Franziska ; PREUSCHE, Carsten: The DLR bimanual haptic device with optimized workspace. In: *Robotics and Automation (ICRA)*, 2011 IEEE International Conference on IEEE, 2011, S. 3441–3442
- [Höl13] HÖLTKEMEIER, Dipl. Ing. U.: *Das Prinzip macht's*. Abgerufen: 2016-11-28. www.harmonicdrive.de/de/presse/pressearchiv. Version: 2013. – Interview mit Dr.- Ing. Matthias Mendel, Leiter Forschung und Entwicklung bei Harmonic Drive
- [HSA⁺08] HULIN, Thomas ; SAGARDIA, Mikel ; ARTIGAS, Jordi ; SCHÄTZLE, Simon ; KREMER, Philipp ; PREUSCHE, Carsten: Human-scale bimanual haptic interface. In: *Proceedings*, 2008
- [Ibe87] IBERALL, Thea: Grasp Planning from Human Prehension. In: *IJCAI* Bd. 87 Citeseer, 1987, S. 1153–1157
- [IM16] IFF MAGDEBURG, Fraunhofer I. a.: *Mobile Manipulation: Der Assistenzroboter ANNiE*. Abgerufen: 2016-08-11. <http://www.iff.fraunhofer.de/de/geschaeftsbereiche/robotersysteme/forschungsplattform-annie.html>. Version: 06/2016. – s. Broschüre
- [KHN⁺09] KONIETSCHKE, Rainer ; HAGN, Ulrich ; NICKL, Mathias ; JÖRG, Stefan ; TOBERGTE, Andreas ; PASSIG, Georg ; SEIBOLD, Ulrich ; LE TIEN, Luc ; KÜBLER, Bernhard ; GRÖGER, Martin u. a.: The DLR MiroSurge-A robotic system for surgery. In: *ICRA* Bd. 9, 2009, S. 1589–1590
- [LASH⁺07] LOUGHLIN, Clive ; ALBU-SCHÄFFER, A ; HADDADIN, S ; OTT, Ch ; STEMMER, A ; WIMBÖCK, T ; HIRZINGER, G: The DLR lightweight robot: design and control concepts for robots in human environments. In: *Industrial Robot: an international journal* 34 (2007), Nr. 5, S. 376–385
- [rob16] ROBOTICS qb: *qb hand*. Abgerufen: 2016-12-20. www.qbrobotics.com. Version: 2016
- [RS15] ROA, Máximo A ; SUÁREZ, Raúl: Grasp quality measures: review and performance. In: *Autonomous robots* 38 (2015), Nr. 1, S. 65–88

- [Sca15] SCARCIA, Umberto: Design and Control of Robotic Hands. (2015)
- [VHS⁺14] VOGEL, Jörn ; HADDADIN, Sami ; SIMERAL, John D. ; STAVISKY, Sergey D. ; BACHER, Daniel ; HOCHBERG, Leigh R. ; DONOGHUE, John P. ; SMAGT, Patrick van d.: Continuous control of the dlr light-weight robot iii by a human with tetraplegia using the braingate2 neural interface system. In: *Experimental Robotics* Springer, 2014, S. 125–136

Selbstständigkeitserklärung

”Die vorliegende Abschlussarbeit wurde von mir selbständig verfasst und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt. Wörtliche und sinngemäße Zitate im Text sind als solche gekennzeichnet.”

Ort, Datum

Unterschrift